Schriftenreihe des Vereins für
Wasser-, Boden- und Lufthygiene

36

Herausgegeben von **Prof. Dr. F. Meinck**

Zur Ermittlung der Durchlässigkeit von Lockersedimenten durch Laborversuche und Versickerung im Gelände

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung der Würde eines
Dr. rer. nat.
des
Fachbereiches 24 (Geowissenschaften)
der
Freien Universität Berlin

Vorgelegt von Hans-Werner Möller aus Kiel
1972

Gustav Fischer Verlag · Stuttgart · 1972

1. Berichterstatter: Prof. Dr. W.-D. Grimm
2. Berichterstatter: Prof. Dr. H.-J. Schneider

Tag der mündlichen Prüfung: 4. 7. 1972

Schriftenreihe des Vereins für
Wasser-, Boden- und Lufthygiene 36

Herausgegeben von **Prof. Dr. F. Meinck**

Zur Ermittlung der Durchlässigkeit von Lockersedimenten durch Laborversuche und Versickerung im Gelände

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung der Würde eines
Dr. rer. nat.
des
Fachbereiches 24 (Geowissenschaften)
der
Freien Universität Berlin

Vorgelegt von Hans-Werner Möller aus Kiel
1972

Gustav Fischer Verlag · Stuttgart · 1972

Alle Rechte der Übersetzung vorbehalten
Copyright by Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Berlin Dahlem
Printed in Germany

Broco-Druck, Berlin-West

Inhaltsangabe

Vorwort		5
Einleitung		7
1	Definition der Begriffe Porenanteil und Durchlässigkeit	7
1.1	Der Porenanteil	7
1.2	Die Durchlässigkeit	9
1.2.1	Die physikalischen Grundlagen für das Durchströmen von porösen Medien	9
1.2.2	Definition für den Begriff Durchlässigkeit	11
1.2.3	Gültigkeitsbereich des linearen Widerstandsgesetzes nach *Darcy*	13
1.3	Beziehungen zwischen Porenanteil und Durchlässigkeit	14
2	Eigene Laborversuche	15
2.1	Beschreibung der für die Laboruntersuchung beprobten Sedimente	15
2.2	Die Probenentnahme und ihre Fehlermöglichkeiten	17
2.2.1	Zur Orientierung der Probeachse	19
2.3	Die Messung des Porenanteils	20
2.3.1	Diskussion der Ergebnisse	21
2.4	Die Messung der Durchlässigkeit	22
2.4.1	Übersicht über die verschiedenen Verfahren	22
2.4.2	Angewandte Verfahren	23
2.4.3	Diskussion der Ergebnisse	28
3	Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Versickerungsversuchen im Gelände	29
3.1	Theorie des Infiltrationsvorganges	29
3.2	Aus der Infiltrationstheorie abgeleitete Methode zur Bestimmung eines Durchlässigkeitsbeiwertes	30
3.3	Methoden zur Kontrolle des Versickerungsvorganges	32
3.3.1	Anwendung der Neutronensonde zur Kontrolle der Wassersättigung	32
3.3.2	Bestimmung des pF-Wertes zur Kontrolle der kapillaren Saugspannung	33
3.4	Durchführung des Versickerungsversuchs mit der Neutronensonde	34
3.5	Vergleichsuntersuchungen an Laborproben	36
4	Vergleich und Diskussion der Ergebnisse aus der Versickerungsmessung und den Labormessungen	37
Zusammenfassung		38
Tabellen 1 - 5		39 - 43
Literaturangaben		44
Anhang: Abbildungen 1 - 18		

Vorwort

Herr Prof. Dr. W.-D. Grimm regte die folgende Arbeit an, wofür ich ihm hiermit herzlich danken möchte.

Die Arbeit wurde in den Räumen des Lehrstuhls für Angewandte Geologie der Freien Universität Berlin angefertigt. Dem Leiter dieses Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr. H.-J. Schneider, danke ich ganz besonders für die Überlassung eines Arbeitsplatzes und Diskussion einzelner Arbeitsphasen.

Ferner danke ich dem Leiter des Instituts für Wasser-, Boden- und Lufthygiene im Bundesgesundheitsamt, Herrn Ersten Direktor und Professor Dr. F. Höffken, der mich in seinem Institut beschäftigte und es mir ermöglichte die Neutronensonde zu benutzen.

Darüberhinaus möchte ich mich bei all denen bedanken, die mir in beiden Instituten nie ihre Hilfe versagt haben. Besonders Herr Prof. Dr. H. Brühl förderte die Arbeit mit vielen guten Ratschlägen.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützte meine Arbeit finanziell und stellte einen Teil der benötigten Geräte zur Verfügung.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548902_0006

Zur Ermittlung der Durchlässigkeit von Lockersedimenten durch Laborversuche und Versickerung im Gelände

von H.-W. Möller

Einleitung

Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, Untersuchungsmethoden zur Ermittlung des Sedimentparameters „Durchlässigkeit" im Rahmen angewandt-geologischer Kartierungsarbeiten zu prüfen.

Da diese Kartierungen u.a. Vorarbeiten für spezielle Aufgaben der Wasserwirtschaft oder der Bauwirtschaft darstellen, sind die zur Verfügung stehenden Mittel meist nicht so hoch, daß ausgedehnte Versuchsbohrungen und Pumpversuche durchgeführt werden können. Es wurde daher darauf Wert gelegt, die Bestimmung der Durchlässigkeit mit Labormethoden durchführen zu können. Eine weitere Verminderung des Aufwandes wurde darin gesucht, die Messungen im Gelände durchzuführen, um unbefriedigende Messungen an Ort und Stelle sofort wiederholen zu können und so zu verhindern, daß zu große Probenmengen in das Labor transportiert werden müssen.

Als regionales Beispiel wurden die oberflächennahen Lockersedimente der ostniederbayrischen Molasse herangezogen, wie sie auf Gradabteilungsblatt 7644, Triftern anzutreffen sind.

Anschließend wurde eine Methode zur Bestimmung der Durchlässigkeit mittels Versickerung von Wasser im Gelände entwickelt und mit der Neutronensonde überprüft. Hierfür wurden glazigene Sedimente in Berlin-Wannsee herangezogen.

1 Definition der Begriffe Porenanteil und Durchlässigkeit

1.1 Der Porenanteil

Nach *Schultze u. Muhs* (1967, S.366 f.) wird der Porenraum, auch Porenvolumen oder Porenanteil eines Bodens als das Verhältnis von Hohlraum zu Gesamtraum bezeichnet und gewöhnlich in Prozenten angegeben. Das Formelzeichen lautet „n".

Die Porenziffer stellt das Verhältnis des Hohlraumes zum Raum der dicht gedachten Masse des Bodens dar. Sie wird mit „ϵ" gekennzeichnet und ist dimensionslos.

Nach *Engelhardt, v.* (1960, S.1 f.) setzt sich das Gesamtvolumen einer Gesteinsprobe aus dem Volumen der festen Bestandteile und dem Volumen der Hohlräume oder Poren zusammen. Als Porosität „ϵ" ist hier der Porenraum in Teilen des Gesamtvolumens definiert. Neben der Porosität benutzt *v. Engelhardt* zur Kennzeichnung des Gesteins auch den relativen Porenraum „E". Dieser ist das Verhältnis von Porenraum zu Feststoffvolumen und wieder s.o. dimensionslos. Die so definierten Parameter Porosität bzw. relativer Porenraum umfassen alle Hohlräume des Gesteins. Man spricht deshalb von

der totalen Porosität. Von ihr zu unterscheiden ist die effektive Porosität, auch Nutzporosität genannt. Sie ist kleiner als die totale Porosität und mißt nur den Porenraum, der aus allen miteinander verbundenen Hohlräumen besteht.

Nach dem Entwurf DIN 4015 (1968, S.2) heißt es, daß der Porenanteil „n" durch das Porenvolumen, bezogen auf das Gesamtvolumen, ausgedrückt wird, während die Porenzahl „e" durch das Porenvolumen, bezogen auf das Feststoffvolumen, bestimmt wird.

Nach *Todd* (in *Chow* 1964, S.13-4) ist „porosity" der kommunizierende Hohlraum geologischer Körper. Diese ist definiert als:

$$\alpha = \frac{w}{V} \quad , \qquad (1)$$

wobei w die Menge Wasser ist, die benötigt wird, um den gesamten Hohlraum auszufüllen, V das gesamte Volumen des Gesteins darstellt. Der Porenraum α wird in Prozent des Gesamtvolumens angegeben.

Speziell für hydrologische Zwecke rechnet *Todd* mit einem anderen Wert: Wenn das Grundwasser aus einem Aquifer herausgepumpt wird, bleibt eine gewisse Menge Wasser zurück, die durch Molekularkräfte und die kapillare Saugspannung im Porenraum zurückgehalten wird. Diese zurückgehaltene Wassermenge wird als „specific retention" bezeichnet und ebenfalls in Prozent angegeben. Das Wasser, das schwerkraftbedingt aus dem porösen Gestein ausfließt, wird „ specific yield " oder „effective porosity" genannt.

Das gesamte Porenvolumen eines Gesteins setzt sich somit nach *Todd* aus „specific retention" und „specific yield" zusammen (s.Abb.2, nach *Eckis* zit. von *Todd* in *Chow*, 1964, S.13-5 verändert).

Die Begriffe Porenraum nach *Schultze u. Muhs*, Porosität nach *v.Engelhardt*, Porenanteil nach *DIN 4015* und porosity nach *Todd* definieren somit die gleiche Größe. Der Unterschied zwischen totalem und effektivem Porenraum nach *v.Engelhardt* kann hier unberücksichtigt bleiben, da in Lokkersedimenten, wie sie in dieser Arbeit untersucht werden, totaler und effektiver Porenraum gleich groß sind.

Die Begriffe „specific yield" und „specific retention" nach *Todd* werden bei Problemen gebraucht, die sich mit der Durchsickerung oder Entwässerung eines porösen Materials befassen.

Die Vielzahl der oben angeführten Bezeichnungen gibt Anlaß zu Verwechslungen. In dieser Arbeit soll die Bezeichnung Porenanteil gemäß dem Entwurf DIN 4015 (1968, S.2) verwendet werden. Zur Veranschaulichung dieses neu gefaßten Begriffes „Porenanteil" dient die Abb. 1 (nach *Schultze u. Muhs*, 1967, S.366 verändert) mit den Definitionen aller zitierten Autoren.

Die relativ einfachen Bestimmungsmethoden werden im Kapitel 2.3 erläutert.

1.2 Die Durchlässigkeit

1.2.1 Die physikalischen Grundlagen für das Durchströmen von porösen Medien

Auf Grund von Laborversuchen über das Strömen von Wasser durch Sande fand *Darcy* (1856) die Beziehung:

$$v_f = k \cdot I \qquad (2)$$

Die Formel sagt aus, daß sich Wasser mit einer angenommenen Geschwindigkeit v_f durch ein Filterbett bewegt, in dem es einen Widerstand erfährt, der von einem konstanten Faktor k abhängt, sowie vom hydraulichen Gefälle I, ausgedrückt durch den Quotienten Druckabfall und Länge der durchflossenen Filterstrecke.

Dieses einfache lineare Widerstandsgesetz gilt nur als Sonderfall allgemeinerer Lösungen, wie spätere Untersuchungen ergeben haben.

Damit dieses Gesetz zutrifft, müssen bestimmte Voraussetzungen gegeben sein:

a) Es muß die Kontinuitätsgleichung erfüllt sein, d.h. daß die Strömung ohne Quellen oder Senken - ohne daß Flüssigkeit hinzutritt oder verschwindet - durch das poröse Medium strömt und daß sie stationär ist.

b) Außerdem muß die Dichte ρ und die dynamische Viskosität η der Flüssigkeit konstant sein.

c) Es muß sich um eine laminare Strömung handeln.

d) Das durchströmte Medium muß homogen und isotrop aufgebaut sein.

Zur Voraussetzung a) ist zu sagen, daß die Grundwasserströmung in einem natürlichen Aquifer diese näherungsweise erfüllt, wenn man einen kleinen zylindrischen Ausschnitt betrachtet.

Zur Voraussetzung b) ist zu sagen, daß das fließende Medium Wasser im mitteleuropäischen Raum so geringe Schwankungen in Dichte und dynamischer Viskosität aufweist, wenn es in einigen Metern Tiefe durch poröse Sedimente fließt, daß die Abweichungen vernachlässigbar klein sind.

Zur Voraussetzung c) ist zu sagen, daß das Strömen durch ein poröses Material näherungsweise mit dem Fließen durch eine enge Röhre verglichen werden kann. Hierfür gilt nach dem Gesetz von *Hagen u. Poiseulle:*

$$q = \frac{\pi \; a^4}{8 \; \eta \; l} \quad (p_1 - p_2) \qquad (3)$$

d.h., daß die in der Zeiteinheit durchströmende Menge q abhängig ist vom Querschnitt a, der Länge l sowie der dynamischen Viskosität η und dem Druckabfall $(p_1 - p_2)$. Anders ausgedrückt, wenn man eine mittlere Durchflußgeschwindigkeit einführt

$$\bar{w} = \frac{q}{a^2 \; \pi} \qquad (4)$$

ist zur Aufrechterhaltung dieser Geschwindigkeit ein Druckverlust

$$(p_1 - p_2) = \frac{8\,\eta\,l}{\pi\,a^4}\,q = \frac{8\,\eta\,l}{a^2}\,\bar{w} \qquad (5)$$

beziehungsweise eine Kraft

$$K = \pi\,\eta\,l\,\bar{w} \qquad (6)$$

erforderlich. Dieser Kraft entgegengesetzt ist der dem Betrag nach der Kraft K gleiche Widerstand der Rohre

$$W = 8\,\pi\,\eta\,l\,\bar{w} \qquad (7)$$

Dieses Gesetz gilt nur für den laminaren Fall.

Die Strömung ist laminar, wenn ein bestimmtes Verhältnis von Dichte, Geschwindigkeit, Querschnitt und Viskosität gegeben ist. Dieses Verhältnis, das die Beziehungen der Trägheitskräfte zur Kraft der inneren Reibung ausdrückt, wird durch die *Reynolds*'sche Zahl wiedergegeben. Die Dimension der Trägheitskraft ist:

$$\frac{\rho\,q^2}{l} \qquad (8)$$

Die Dimension der Reibungskraft pro Volumenelement ist:

$$\frac{\eta\,q}{l^2} \qquad (9)$$

Das Verhältnis beider ist die *Reynolds*'sche Zahl:

$$R_e = \frac{\rho\,q^2}{l} : \frac{\eta\,q}{l^2} = \frac{\rho\,q\,l}{\eta} \qquad (10)$$

Wenn man die dynamische Viskosität durch die kinematische Viskosität

$$\frac{\eta}{\rho} = \nu \qquad (11)$$

ersetzt, ergibt sich:

$$Re = \frac{q\,l}{\nu} \qquad (12)$$

Hierin bedeuten: q = Querschnitt des durchströmten Kanals
l = Länge des durchströmten Kanals
ρ = Dichte der Flüssigkeit
η = dynamische Viskosität
ν = kinematische Viskosität

Im Falle der „engen Röhren", die hier als Modell betrachtet werden, ist der Umschlag von laminarer Strömung in turbulente Strömung bei einer kritischen *Reynolds*schen Zahl von $R_{ek} \sim 1160$ zu beobachten.

Wie die Arbeiten verschiedener Autoren ergeben haben, z.B. *v.Engelhardt* (1960) und *Tessendorf* (1962), gilt das Gesetz von *Hagen u. Poiseulle* auch für nicht kreisförmige Röhren sowie für die mathematisch nicht genau zu

erfassenden Porenquerschnitte eines porösen Mediums.

Für den Fall der Porenquerschnitte eines Lockersedimentes muß berücksichtigt werden, daß die kritische *Reynolds*'sche Zahl durch die unregelmäßige Form, Querverbindungen, Toträume und dadurch bedingte Bildung von Wirbeln niedriger liegt als in kreisförmigen Röhren. Ein von allen Autoren anerkannter Zahlenwert ist noch nicht gefunden; es werden Werte zwischen 1 und 10 angegeben.

Wenn man die *Darcy* - Formel mit der Formel für den Widerstand in engen Röhren vergleicht, erkennt man, daß sowohl der Widerstand in Röhren als auch die Filtergeschwindigkeit im porösen Medium in linearer Abhängigkeit von bestimmten Größen auftreten.

Zur Voraussetzung d) ist zu sagen, daß sie, streng genommen, in der Natur nicht anzutreffen ist. Auf Grund des Ablagerungsmechanismus' klastischer Sedimente ist über kleine Räume wohl eine Homogenität gegeben. Die Einregelung nach der Schwerkraft und der Form der Einzelkomponenten führt jedoch zu einer im Laborversuch deutlich zu beobachtenden Anisotropie. Da die Versuche nach *Darcy* die Strömung nur in einer Richtung messen, ist die Anisotropie nicht als Meßfehler zu betrachten. Man muß aber berücksichtigen, daß der erhaltene Wert für eine Probe nur in der gemessenen Richtung gilt. Da die Versuche relativ zum Gesamtgestein stets nur an kleinen Teilbereichen durchgeführt werden können, gelten die Ergebnisse wegen der Inhomogenität und Anisotropie natürlicher Sedimente also nur für den Probenentnahmepunkt.

In allgemeiner Form kann das *Darcy*'sche Gesetz auch als dreidimensionale Differentialgleichung geschrieben werden:

$$\vec{q} = - k \nabla H \qquad (13)$$

Hierin bedeuten: $\vec{q}$ = die Durchflußrate, ein Vektor
k = die Materialkonstante, ein Skalar
∇H = der Druckgradient in der Schreibweise als Nablaoperator, ein Vektor.

Wörtlich besagt die Gleichung, daß das Fließen einer Flüssigkeit durch ein poröses Medium, bei einer proportionalen Rate, in die Richtung der Kraft geht, die auf die Flüssigkeit wirkt (Druckgradient), unter Wahrung der Proportionalität zur Durchlässigkeitseigenschaft des porösen Mediums. Im eindimensionalen System, das zur Ermittlung der Materialkonstante k angewandt wird, lautet die Gleichung

$$q = - k \frac{dH}{dx} \qquad (14)$$

woraus man nach Einsetzen von Zahlenwerten wieder auf die o.a. *Darcy*'sche Gleichung

$$v_f = k I \qquad (2)$$ kommt.

1.2.2 Definition für den Begriff Durchlässigkeit

Die *Darcy*'schen Versuche ergaben eine Formel zur Berechnung der Durch-

lässigkeit, die für mehrere Sachgebiete von großer Wichtigkeit ist. Viele Autoren der Fachrichtungen Bodenkunde, Wasserwirtschaft, Erdölindustrie und Verfahrenstechnik führten die Forschungen fort und kamen zu mehr oder weniger gleichen Ergebnissen.

Danach ist die Durchlässigkeit oder Permeabilität nach *v.Engelhardt* (1960, S.59), *Mayer-Gürr* (in *Bentz u. Martini* 1968, S.672 ff.) und *Müller* (1964, S.264) eine charakteristische Beschaffenheit des Porenraumes eines Gesteins, die bedingt ist durch die spezielle geometrische Struktur und Größe des Porenraumes, wie etwa die Querschnittsgröße und Form der Poren, deren räumlicher Verlauf und ihre gegenseitige Verknüpfung.

Für die Ermittlung der Durchlässigkeit sind außerdem die physikalischen Eigenschaften der fließenden Medien, wie Dichte, Viskosität und Kompressibilität zu berücksichtigen. Für die Durchlässigkeit ergibt sich dann folgende Formel:

$$q = \frac{k}{\eta} \quad \frac{\Delta p}{l} \qquad (15)$$

wobei q = Q pro F und t.
D.h.: Fließt 1 Kubikzentimeter Flüssigkeit oder Gas (Q) in 1 Sekunde (t) mit einer dynamischen Viskosität (η) von 1 Centipoise durch ein 1 Zentimeter langes Gesteinsstück (l) mit einem Querschnitt (F) von 1 Quadratzentimeter bei einem Druckunterschied von 1 Atmosphäre (Δp) zwischen Eintritts- und Austrittstelle bei einer Temperatur von 0° Celsius und einem Quecksilberstand von 760 mm, dann ist die Durchlässigkeit des Gesteins gleich 1 Darcy (d).

Die Größe „1Darcy" hat sich in der Praxis als sehr hoch erwiesen, weshalb es üblich ist, in Tausendstel Darcy zu rechnen. Als Dimension für das Darcy (d) ergibt sich (cm^2).

Nach *Schultze u. Muhs* (1967, S.423) wird die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens durch den Durchlässigkeitsbeiwert k angegeben, d.h. nach dem Gesetz von *Darcy*

$$v_f = k \; I \qquad (2)$$

durch die Geschwindigkeit in Metern pro Sekunde, mit der Wasser von 20° C mit dem Gefälle H durch l gleich I die in das Versuchsgerät eingebaute Probe von der Höhe 1 durchfließt.

Wie die vorstehend angeführten Beispiele zeigen, wird die Durchlässigkeit von den einzelnen Autoren in unterschiedlichen Dimensionen gemessen. Der scheinbare Widerspruch entsteht durch die unterschiedliche Berücksichtigung der verschiedenen Einflußfaktoren.

Nach *Terzaghi u. Peck* (1961, S.47) ist „K" eine empirisch gefundene Konstante, die als „physikalischer Durchlässigkeitswert" bezeichnet wird. Der Wert „K" mit der Dimension (cm^2) ist für jedes durchlässige Material mit bestimmtem Porenanteil und gleicher Form und Größe der Poren eine Konstante. Er ist unabhängig von den physikalischen Eigenschaften der Sickerflüssigkeit. Diese Definition stimmt mit der von *v.Engelhardt, Mayer-Gürr u. Müller* überein, die von ihrer Aufgabenstellung her die unterschied-

lichen Viskositäten von Erdöl, Salzwasser und Erdgas berücksichtigen müssen.

In der Wasser- und Baugeologie dagegen hat man es bei Problemen, die das Strömen von Grundwasser durch Lockergesteine betreffen, nur mit einem strömenden Medium zu tun. Die Temperatur dieses Wassers schwankt so wenig, daß sein Raumgewicht als konstant betrachtet werden kann. Außerdem hält sich die Viskositätsänderung, die von der Art der Flüssigkeit und der Temperatur abhängt, in engen Grenzen. Es ist deshalb üblich, im System Wasser und Boden diese Faktoren zu vernachlässigen und sich mit dem Durchlässigkeitsbeiwert „k" gemessen in (m/s) zu begnügen.

Nach *Todd* (in *Chow* 1964, S.13-8) gelten im Geological Service der Vereinigten Staaten zwei Definitionen für die Durchlässigkeit, die auf die oben beschriebene einfache Grundformel nach *Darcy* zurückgehen:

a) der „laboratory (or standard) coefficient of permeability k_s", definiert als Durchfluß von Wasser bei 60° Fahrenheit, gemessen in gallons pro Tag, durch einen Filterquerschnitt von 1 Quadratfuß unter einem hydraulischen Gradienten von 1.

b) der „field coefficient of permeability k_f", definiert als Durchfluß von Wasser gemessen in gallons pro Tag durch einen Filterquerschnitt des Aquifers von 1 Fuß Mächtigkeit und 1 Meile Breite unter einem hydraulischen Gradienten von 1 Fuß pro Meile bei Feldtemperatur.

Die Dimensionen entsprechen im metrischen System dem Durchlässigkeitswert nach *Schultze u. Muhs* oder *Terzaghi u. Peck.*
Unter Berücksichtigung der Dichte ρ und der dynamischen Viskosität η erhält auch *Todd,* ebenso wie *v.Engelhardt u. Mayer-Gürr,* eine in Flächeneinheiten angegebene Konstante, die „specific (or intrinsic) permeability k", die in Darcy gemessen wird. Sie entspricht der Gesteinskonstante „K" nach *Terzaghi u. Peck.*

In vorliegender Arbeit werden gleichzeitig der Durchlässigkeitsbeiwert „k" und die Gesteinskonstante „K" ermittelt. Die Umrechnung erfolgt nach der von *Todd* (in *Chow*, 1964, S.13-9) angegebenen Umrechnungstabelle:

1 k_s	=	4,72	10^{-5}	cm/s	
1 k_s	=	0,0408		m/Tag	
1 k_s	=	0,134		ft/Tag	
1 Darcy	=	0,987	10^{-8}	cm^2	
1 Darcy	=	1,062	10^{-11}	ft^2	
1 Darcy	entspricht	18,2		k_s	(Wasser bei 60°F)
1 Darcy	"	~ 1	10^{-5}	m/s	(Wasser bei 20°C)
1 Darcy	"	0,966	10^{-3}	cm/s	
1 cm/s	"	1,02	10^{-5}	cm^2	

1.2.3 Gültigkeitsbereich des linearen Widerstandsgesetzes nach DARCY

Wie oben erläutert wurde, gilt die von *Darcy* empirisch ermittelte Formel nur unter bestimmten Voraussetzungen. Nach *Dürbaum* (in *Bentz u.Martini* 1969, S.1476 f.) ist das *Darcy*'sche Gesetz nicht brauchbar, wenn neben

der Schwerkraft in erheblichem Maße Oberflächenkräfte oder elektrostatische Kräfte im Porenraum wirken, oder wenn die Geschwindigkeit so hoch wird, daß die laminare in turbulente Strömung übergeht.

Nach *Kühn* (1968, S.69) gibt das *Darcy*'sche Gesetz die tatsächlichen Strömungsvorgänge im porösen Medium nur sehr vereinfacht wieder. Das Gesetz gilt nur solange, bis die Trägheitskräfte zum turbulenten Fluß führen (= obere Grenze) oder die Oberflächenkräfte die Strömung behindern (= untere Grenze). Die „untere Grenze" soll dabei nach *Kühn* für reines Quarzmaterial im Schluffkornbereich liegen. Bei diesem Material stellt nur das hygroskopisch an die Kornoberfläche gebundene Wasser ein Hindernis für das Strömen dar. Da die Schichtdicke dieses Wassers nur einige Moleküle stark ist, ist die dadurch verursachte Verringerung des Porenanteils bis zum Bereich der Schluffkorngröße vernachlässigbar klein.

Nach *v.Engelhardt u. Tunn* (1954, S.12) muß für natürliche Sedimente berücksichtigt werden, daß bei Anwesenheit von Tonmineralien die Durchlässigkeit für Wasser im Gegensatz zu unpolaren Flüsisgkeiten stark abnimmt. Infolge der Dipolwirkung der Wassermoleküle werden je nach dem Kationenbelag der Oberflächen der Tonminerale mehr oder weniger starke Schichten von Hydrationswasser gebunden, die die Durchlässigkeit auf Grund ihrer größeren Schichtdicke mehr behindern als die hygroskopische Wasserhülle. Damit kann für die untere Grenze der Gültigkeit des *Darcy*'schen Gesetzes nur dann ein einigermaßen fixierter Wert angegeben werden, wenn es sich um reines Quarzmaterial handelt. Bei Tongehalt im Sediment ist die gemessene Durchlässigkeit also für Wasser niedriger als z.B. für Gase.

Die „obere Grenze" der Gültigkeit des Gesetzes wird nach *Geiseler* (1967, S.36) für Filterkies bis 8 mm Korndurchmesser und einen mittleren Porenanteil von 36 % für eine kritische *Reynolds*'sche Zahl $R_{ek} = 5$ angegeben, welche bei einer Filtergeschwindigkeit von 0,07 cm/s erreicht wurde.

1.3 Beziehungen zwischen Porenanteil und Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit ist jedoch nicht von der auf S. 2 angegebenen Gesamtsumme der einzelnen Hohlräume abhängig, sondern ganz wesentlich von der Größe und Form der Einzelporen. Der Porenanteil „n" eines porösen Materials ist wiederum nicht abhängig von Form und Größe des Querschnitts der Einzelporen.

Beispielsweise kann der Porenanteil eines extrem feinkörnigen Materials mit extrem kleinen Querschnitten der Einzelporen höher sein als der Porenraum eines grobkörnigen Materials. So ergaben sich nach *v.Engelhardt* (1960, S. 81) für eine sehr feinkörnige Schreibkreide aus NW-Deutschland ein Porenanteil von 40 % und sehr geringe Durchlässigkeiten von der Größenordnung $1 \cdot 10^{-3}$ md, ein grobkörniger Sand mit dem gleichen Porenanteil hatte dagegen eine um den Faktor 10^4 größere Durchlässigkeit!

Aus einem Diagramm nach *Eckis* (zit. von *Todd* in *Chow* 1964, S.13-4) geht der Zusammenhang zwischen Porenanteil und Durchlässigkeit gut hervor (s.Abb.2):

An Sedimenten des South Coastal Basin (Kalifornien) wird gezeigt, daß der Porenraum im Kies und Grobsandbereich mit kleiner werdendem Durchmesser der Einzelkörner ansteigt, ebenso - wenn auch mit anderen Steigungen gen - die „specific yield" (spezifische Ergiebigkeit) und die „specific retention" (spezifische Zurückhaltung). Mit enger werdenden Porenquerschnitten sinkt die Ergiebigkeit stark, während die Zurückhaltung mit dem Porenanteil weiterhin ansteigt. Daß auch dieses Diagramm nach *Eckis* nur für einen speziellen Fall gilt, geht daraus hervor, daß der Porenanteil eines Sedimentes je nach der Lagerungsdichte erheblich schwankt. Wie o.a. nehmen auch der Gehalt an Tonmineralien sowie die Form der Kornsummenlinie einen Einfluß auf die Durchlässigkeit und damit auf die Ergiebigkeit.

Eine Näherungslösung, über die Korngröße allein oder über die Korngröße und den Porenanteil zur Berechnung der Durchlässigkeit zu gelangen, ist von vielen Autoren angestrebt worden z.B. von *Hazen* (1895), *Kozeny* (1927), *Slichter* (1899) und *Chardabellas* (zit. in *Chardabellas* 1940). Auf diese Methode wird im Kapitel 2.4.2 eingegangen.

2 Eigene Laborversuche

Da es Aufgabe dieser Arbeit ist, Durchlässigkeitswerte auf möglichst einfache Weise zu bestimmen, wurden zunächst die bisher üblichen Methoden der Gelände- und Laboruntersuchung an Proben aus der Ostniederbayrischen Molasse überprüft.

2.1 Beschreibung der zur Laboruntersuchung beprobten Sedimente

Die für die Laboruntersuchung zur Bestimmung der Durchlässigkeit verwendeten Proben entstammen dem Gebiet des Gradabteilungsblattes 7644 Triftern sowie seiner nächsten Umgebung.

Das Gebiet liegt geologisch gesehen in der Ostniederbayrischen Molasse und enthält nach *Grimm* (1957) Sedimente, die vom mittleren Miozän bis zum unteren Pliozän datieren. In diesen Zeitabschnitt fällt der Übergang von den marinen Schichten der Oberen Meeresmolasse (OMM) über die in brackischem bis süßem Wasser abgelagerten Schichten der Süßbrackwassermolasse (SBM) bis zu den limnischen und fluviatilen Schichten der Oberen Süßwassermolasse (OSM) (s.Abb. 3). Die Kartierung erfolgte in den fünfziger Jahren durch *Grimm, Mayr* und *Wittman*.

Laut *Grimm* (1957) ist die Schichtenfolge von den marinen Sedimenten bis einschließlich des Quarzitkonglomerats mit einem Einfallen von 5 m auf den km nach WNW gekippt.

Das ganze Gebiet wurde während der Sedimentation der Süßbrackwassermolasse in wellenartiger Bewegung gehoben, wodurch die Aussüßung des Molassemeeres bewirkt wurde. Zur Zeit der Bildung des Quarzitkonglomerats war das Gebiet trockengefallen und vor der Erosion geschützt. Im Westen konnte sich die Peracher Rinne eintiefen. Nach Rückverlegung der Trogachse nach Süden, fand dann die abschließende Sedimentation der Hangendserie statt. Seither erfolgt eine langsame Heraushebung mit Ausbil-

dung des heutigen Reliefs. Nach *Mayr* (1957) finden sich über das ganze Gebiet verstreut immer wieder Anzeichen lokaler Zerrungstektonik. So läßt z.B. eine Verwerfungstreppe NW Stubenberg durch Höhenvergleiche an Leithorizonten einen Verwerfungsbetrag von 10 m erkennen. Allerdings kann der Verdacht nicht ausgeschlossen werden, daß es sich hierbei um Abrisse handelt, die durch das Relief bedingt sind.

Vom Liegenden zum Hangenden stehen folgende Schichten an:

I. Die Feinsandserie als jüngste Schicht der OMM besteht nach *Meier, G.K.* (1969, S.18) aus Mergeln mit Korngrößen von Ton bis Feinsand, sog. „Blättermergel", und aus Mittel- bis Grobsanden mit Feinsand und Schluffanteilen bis zu 20 %, sog. „Glaukonitsande". Die „Blättermergel" beziehen ihren Namen aus einer Wechsellagerung im Millimeterrhythmus von Mergel und Feinsand, die für die Probenentnahme besonders ungeeignet ist: Sie führt an den Schichtgrenzen zu einer Aufblätterung, wodurch die Probe nicht mehr als ungestört betrachtet werden kann. Es wurde daher aus diesem Schichtglied keine Durchlässigkeit bestimmt.
Von den Glaukonitsanden konnten aus dem Aufschluß südlich des Bahnhofs Birnbach mühelos mehrere Proben ausgestochen werden

II. Die Mehlsande stellen die liegendste Einheit der Süßbrackwassermolasse dar. Diese wird in vier palaeontologisch - petrographisch unterschiedliche Sedimentserien aufgeteilt *(Wittmann 1957)*. Die Kornsummenlinie zeigt einen Schluff mit wechselnden Ton- und Feinsandanteilen an. Die Proben wurden aus dem Aufschluß Burgstall bei Kößlarn (r: 83580; h: 59700) entnommen. Hierbei mußte das Entnahmegerät mit dem Hammer in das Sediment eingetrieben werden, wobei die Probe wiederholt in verschiedene Einzelstücke zersprang.

III. Durch den Schillhorizont von einigen cm bis wenigen dm Mächtigkeit getrennt, folgen als zweite Einheit die Glimmersande, ein Mittel- bis Feinsand mit geringen Glimmergehalt ist deutlich nach der Schichtung eingeregelt und wirkt sich dadurch besonders auf die Anisotropie des Sedimentes aus. Die Proben wurden dem Aufschluß Stegerkeller bei Kößlarn, Grub bei Kirn (r: 80800; h: 56460) und Walksham bei Triftern (r: 75320; h: 62520) entnommen. Die Probenzylinder konnten mit der Hand eingedrückt werden.

IV. Auf den schmalen Aussüßungshorizont als nächsten Trennhorizont sind als dritte Einheit die Schillsande abgelagert worden. Sie weisen eine geringere Korngröße auf als die Glimmersande. Auch hier trifft man auf eine ausgeprägte Glimmerführung, die in Schichten angereichert ist. Ob die Schillsande tatsächlich beprobt wurden, steht nicht ganz einwandfrei fest, da die Unterscheidung zwischen ihnen und den Uniosanden im Aufschluß Pleika bei Triftern nicht genau getroffen werden konnte. (r:457518; h:536318).

V. Zum Hangenden schließen sich als vierte Einheit die Süßwasserschichten an, die auf Grund ihrer Entstehungsbedingungen vielfältige Über-

gänge ausgebildet haben. Die Zusammenfassung vieler Kornsummenlinien ergibt nach *Meier, G.K.* (1969) für die Sande eine Korngröße von Feinsand mit geringen Anteilen an Schluff und Mittelsand, während die Mergel zum größten Teil aus Schluff bestehen mit einem Tonanteil bis zu 20 %. Die Proben wurden den Aufschlüssen südlich Haselbach (r:75890; h:61400) für die sandreichere Fazies und westlich Steinbach (r:75850; h:61160) für die mergelreichere Fazies entnommen. Auch hier konnten die Zylinder von Hand eingedrückt werden.

Über der SBM folgt die Obere Süßwassermolasse mit einer in ihrer Mächtigkeit schwankenden Sedimentserie aus Sanden und Feinkiesen, die auf Blatt Triftern jedoch nicht aufgeschlossen ist.

VI. Hier lagern über den Süßwasserschichten der Quarzrestschotter ein Grobkies mit sandigen Partien an der Basis und im Hangenden sowie m-mächtigen sandig-tonigen Zwischenschichten. Naturgemäß konnten nur aus den Sanden Proben entnommen werden. Sie stammten aus den Aufschlüssen Sturzholz (r:82030; h:61600) für die Zwischenschichten und Nuppling bei Neukirchen außerhalb Blatt Triftern (r:467321; h:536192) für die hangenden Sandschichten. Da die Schichten nicht frei von Kieskorn sind, mußte wiederholt ausgestochen werden, um die Randstörungen zu vermeiden.

VII. Auf den Quarzrestschotter folgt als jüngstes Schichtglied die Hangendserie mit Ton-, Sand- und Kiessedimenten. Die Proben mit feinklastischem Inhalt entstammen der Ziegelgrube Fürstberg (r:79700; h:54750). Die Zylinder mußten mit dem Hammer in das Sediment getrieben werden. Die sandigen Teile der Hangendserie wurden im Aufschluß NW Ulbering (r:75060: h:58330) von Hand entnommen.

Aus den vorstehend aufgeführten Schichten wurden nach Möglichkeit gleichmäßig über das Profil verteilt, insgesamt rund 80 Proben entnommen und zur Untersuchung nach Berlin gebracht. Somit standen für die Ermittlung der Durchlässigkeit Sedimente aus dem Ton-, Sand- und Schluffbereich mit wechselnden Übergängen zur Verfügung. Bei der Untersuchung im Labor stellte sich heraus, daß fast die Hälfte der Proben zur Bestimmung der Durchlässigkeit nicht zu gebrauchen war. So ergaben sich - durch die Probenahme bedingt - für die Tone der Hangendserie und die Mehlsande z.T. so hohe Werte, daß auf eine Zerstörung des primären Lagerungsverbandes geschlossen werden mußte. Bei einigen Tonproben wurden dagegen überhaupt keine meßbaren Werte erhalten, da keine hohen Druckdifferenzen angewandt werden konnten.

2.2 Die Probenentnahme und ihre Fehlermöglichkeiten

Für die Durchlässigkeitsuntersuchungen sollten die Proben möglichst ungestört vorliegen. Dies ist in der Praxis jedoch nicht zu erreichen. Die Proben wurden, wie es in der Baupraxis üblich ist, mit einem Stechzylinder ausgestochen, (s.DIN 4021, 6.2.3, 1955). Dabei wurde ein mit einer Schneide versehener rostfreier Stahlzylinder je nach Beschaffenheit des Sediments durch ein

Führungsrohr mit der Hand hineingedrückt oder mit einem Kunststoffhammer eingeschlagen.In manchen Fällen erwies es sich als günstiger, einen Sedimentkörper vorsichtig freizulegen, der erwas größere Ausmaße hatte als der Zylinder, damit das umgebende Sediment bei der Probenentnahme nach den Seiten ausweichen konnte. Trotz vorsichtiger Handhabung der Probeentnahme konnte eine Reihe von Fehlern nicht vermieden werden, die zu Störungen des natürlich vorhandenen Sedimentverbandes führten. Die Fehler lassen sich in vier Gruppen unterteilen:

a) Die Proben wurden bereits vorhandenen Aufschlüssen entnommen. Das bedeutet, daß die Lagerungsdichte durch Entlastung und Rutschung im Mikrogefüge gegenüber dem ursprünglichen Zustand geringer geworden ist. Witterungseinflüsse wie Frost und Regen arbeiten ebenfalls in diese Richtung. Das Ergebnis ist ein zu großer Wert für die Größen Porenanteil und Durchlässigkeit. Um diesen Fehler möglichst klein zu halten, wurden die Proben nur aus der Basis von großen Aufschlußflächen entnommen, nachdem die angewitterte Schicht ~ 0,5 m abgegraben worden war.

b) Nach *Schultze u. Muhs* (1967, S.126 f.) ergeben sich beim Eindrücken der Zylinder zudem noch Fehler dadurch, daß in locker gelagerten Sand eine Verdichtung eintritt, während in dicht gelagertem Sand, wie er im Arbeitsgebiet vorliegt, der Zylinder bereits voll ist, bevor seine Oberkante mit der Bodenoberfläche bündig wird. Beim weiteren Eintreiben des Zylinders ist dadurch ein Teil des theoretisch ungestörten Probenkörpers über die Zylinderkante hinausgetrieben worden. Dieser Fehler ist bei schlanken Zylindern größer als bei gedrungenen. Da die überstehende, der Probenmenge eigentlich entsprechende Bodenschicht abgestrichen wird und bei den Messungen fehlt, ergeben sich für Porenanteil und Durchlässigkeit verfälschte, d.h. zu große Werte. Um diesen methodischen Fehlern zu begegnen, wurde abweichend von den Angaben der DIN 4021 ein gedrungener Zylinder verwandt und dieser mit einem Vollstempel eingedrückt bzw. eingeschlagen. Dabei ist es wichtig, daß man mit dem hineintreiben dann aufhört, wenn der Zylinder bis zur Oberkante in das Sediment eingedrungen ist. Jedes weitere Eindringen führt, besonders wenn der Hammer benutzt wird, zu einer größeren Verdichtung als der natürlichen.
Der Zylinder wurde aus rostfreiem Stahle gedreht und besitzt die Ausmaße Länge = 8 cm und Innendurchmesser = 10 cm. An einem Ende ist die Zylinderwand zu einer Schneide abgedreht worden. Diese Ausmaße stellen nicht etwa Idealzahlen dar, sondern sind willkürlich gewählt. Das Verhältnis Länge zu Durchmesser läßt aber nach *Schultze u. Muhs* vermuten, daß die Proben weniger gestört entnommen werden können als mit den Zylindern nach der DIN 4021. (S.Abb.4).

c) Ein weiterer Fehler besteht darin, daß beim Einschlagen des Zylinders, je nach Gehalt an bindigem Material oder bei Wechsellagerung von sandigen und tonigen Lagen, der in den Zylinder getriebene Sedimentkörper

unter Bildung von großen Spalten zerfallen kann. Die Meßergebnisse werden durch diese Schaffung von großen Verbindungskanälen durch die gesamte zu untersuchende Probe erheblich verfälscht. Dieser Fehler ist, wenn er nur begrenzt im Innern der Probe auftritt, kaum festzustellen.

d) Durch das Eindrücken des Zylinders in das Sediment wird durch die Schneide eine Störung des natürlichen Kornverbandes hervorgerufen, die zu einer höheren Durchlässigkeit führt. Dies ist besonders dann der Fall, wenn sich ein größeres Korn vor der Schneide festsetzt und einen Kanal an der Innenwand des Zylinders in der Sedimentprobe hinterläßt. Auch dieser Fehler läßt sich nicht vermeiden. In Fällen, in denen er bemerkt wurde, ist die Probenahme an anderer Stelle wiederholt worden.

Während die Entnahme in Sanden mit diskret verteiltem Gehalt von Schluff und Ton sowie in locker gelagerten Mergeln und Tonen keine Schwierigkeiten bot, ist es kaum möglich, ungestörte Proben aus kompakt lagernden Tonen sowie aus wechsellagernden Sedimenten aus Ton und Sand zu entnehmen. Sobald im Sediment grobe Bestandteile (Grobsand, Kies) auftreten, ist eine ungestörte Probenentnahme wegen der Randstörungen ebenfalls nicht zu erwarten.

Bei Porenanteilmessungen fällt dieser Fehler nicht allzusehr ins Gewicht. Dagegen wird die Anzahl der Sedimente, die mit dieser Methode auf Durchlässigkeit untersucht werden können, begrenzt. Es ist also nicht möglich, grobkörnige und verdichtete feinstkörnige Lockergesteine ungestört mit einem Zylinder zu entnehmen, und die so gewonnenen Proben auf ihre Durchlässigkeit zu untersuchen.

Auch für die entnommenen Proben müssen nach dem oben Angegebenen unkontrollierbare Fehler einkalkuliert werden. Da in den meisten Fällen eine Auflockerung gegenüber dem ursprünglichen Zustand eintritt, ist es offensichtlich, daß die mit diesen Proben durchgeführten Messungen zu große Durchlässigkeitswerte ergeben.

2.2.1 Zur Orientierung der Probeachse

Natürliche Sedimente sind fast durchweg anisotrop. Diese Feststellung ist durch die Ablagerungsbedingungen heterogen zusammengesetzter Gesteinskörner im unterschiedlich schnell fließenden Transportmittel Wasser begründet. Die einzelnen Körner, die eine bevorzugte Längenausdehnung aufweisen, wie z.B. Glimmer u.a., regeln sich bei normaler Sedimentation nach der längsten Achse ein und bilden so eine schuppenartige Schichtung aus, die durch anschließende Kompaktion noch ausgeprägter in Erscheinung tritt. Bei Schüttungskörpern, die aus Rippelbildung entstanden sind, ist Regelung in alle Raumrichtungen möglich.

Diese Anisotropie wirkt sich, wie schon in Kap. 2.1 angeführt, auf die Durchlässigkeit eines Lockergesteins aus. Die schuppenartige Schichtung setzt einer senkrecht auf sie wirkenden Wasserströmung mehr Widerstand entgegen als einer waagerechten Strömung.

Da das Grundwasser in erster Linie waagerecht oder mit schwachem Gefälle fließt, wurden zur Untersuchung der Durchlässigkeit Sedimentausschnitte mit waagerechter Achse benötigt. Um über die Richtungsabhängigkeit der Durchlässigkeit Vergleichswerte zu erhalten, wurden auch senkrecht Proben entnommen.

Zu ihrer Entnahme in waagerechter und senkrechter Richtung wurde ein besonderer Führungsblock angefertigt (s.Abb.4). Der Block ist aus Brettern zusammengeleimt, durch die ein dem Außendurchmesser des Zylinders angepaßtes Führungsloch gebohrt ist. Je nach Entnahme einer waagerechten oder senkrechten Probe dient die Unter- oder Seitenfläche des rechtwinkligen Blocks als Unterlage.

Die Ergebnisse der Porenraum- und der Durchlässigkeitsmessungen abhängig von der Entnahmerichtung sind auf den Abb. 5 und 6 dargestellt. Wie aus den Messungen hervorgeht ist auch der Porenanteil der waagerecht und senkrecht entnommenen Proben unterschiedlich groß. Wenn auch der mittlere Fehler nur um 3 % liegt, so sind im Einzelfall immerhin 7 % Differenz festgestellt worden. Mag die Abweichung des Porenraumes auch nicht besonders groß erscheinen, so ist bei den Werten der Durchlässigkeitsmessung ganz klar zu erkennen, daß die senkrecht entnommenen Proben willkürlich bessere oder schlechtere Werte ergeben haben als die waagerecht entnommenen. Nach den o.a. Erkenntnissen müßten die senkrechten Proben jedoch immer schlechtere Durchlässigkeit ergeben als die waagerechten. Die Erklärung für diese der Theorie nicht entsprechenden Ergebnisse ist in der ungenauen, mit den oben beschriebenen Fehlern behaftete, Entnahmemethode begründet.

Schon nach diesen Versuchsergebnissen war erwiesen, daß die Durchlässigkeitsmessungen an Zylinderproben mit der nötigen Einschränkung ihrer Genauigkeit zu bewerten sind.

2.3 Die Messung des Porenanteiles

Die Größe „Porenanteil" wird zur Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes nach der Formel von *Kozeny und Carman* gebraucht. In dieser Arbeit wurden zum Vergleich drei verschiedene Methoden angewandt. Alle drei bestimmen den Porenanteil über die Messung des Feststoffvolumens.

a) Pyknometermethode

Am einfachsten bestimmt man den Porenraum eines Lockersedimentes, indem man in einem Pyknometergefäß die von den Körnern verdrängte Menge Wasser mißt. Das Gerät besteht denkbar einfach aus einem Meßzylinder von mehr als einem Liter Inhalt. Die Gradulierung ist bis auf die 1 - Litermarke unwesentlich, da die genaueste Ablesung mit Hilfe einer Meßbürette erreicht wird, die auf ein zehntel Kubikmillimeter genau geeicht ist. Vor der Messung wird die Probe im Trockenschrank bei 105° C getrocknet. Dabei tritt je nach Zusammensetzung der Probe eine mehr oder weniger starke Verfestigung auf. Für die Messung muß dieses

Material desintegriert werden. Danach wird die Probe unter ständigem Umrühren in das Pyknometergefäß gegeben und auf einem Rütteltisch 10 Minuten gerüttelt, um an den Körnern haftende Luftbläschen zu entfernen. Nach einer Absitzzeit von einer halben Stunde wird mit der Meßbürette die die Meßmarke überschreitende Menge abgehebert und bestimmt.

b) Luftpyknometermethode

Nach *Spoerel* (1957, S.386 f.) Kann der Porenraum mit einem Luftpyknometer bestimmt werden. Das Gerät arbeitet nach dem Gesetz von *Boyle u. Mariotte,* nach dem in einem geschlossenem System das Produkt aus Volumen und Druck konstant ist.
In ein System aus zwei Behältern von konstantem Volumen wird in den einen Behälter die Probe eingefüllt und im anderen Behälter mit einer Luftpumpe ein erhöhter Druck erzeugt. Nachdem man in den luftdicht verschlossenen Behältern über ein Ventil einen Druckausgleich hergestellt hat, zeigt die Druckdifferenz zwischen Ausgangsdruck und Enddruck ein Maß für das nicht zusammendrückbare Volumen der eingebrachten Probe an. Bei einer getrockneten Probe entspricht das dem Feststoffvolumen. Da mit diesem Gerät über eine nomographische Tafel auch der Wassergehalt bestimmt werden kann (Haupteinsatzgebiet in der Baugeologie), eignet es sich zur sofortigen Bestimmung des Porenanteils im Gelände. Die Durchführung der Messung ist der dem Gerät beigegebenen Bedienungsanleitung zu entnehmen.

c) Bestimmung über das Gewicht und die Dichte (2,65)

Ein in der Baugeologie weit verbreitetes Verfahren zur Bestimmung des Porenanteils besteht darin, daß man mit einem Zylinder von bekanntem Volumen eine Probe aussticht, im Trockenschrank bei 105° C trocknet, die Probe wägt und durch das angenommene spezifische Gewicht des Sandes von 2,65 teilt. Das so erhaltene Feststoffvolumen wird vom bekannten Zylindervolumen abgezogen, und die Differenz ergibt die Größe des Porenanteils. Das Verfahren ist mit dem Fehler behaftet, daß das spezifische Gewicht der Proben je nach den unterschiedlichen Bestandteilen Schwankungen unterliegt.

2.3.1 Diskussion der Ergebnisse

Wie Tabelle 2 und Abb. 7 zeigen, beträgt die arithmetrisch gemittelte Abweichung der Meßreihe der Verdrängungsmethode von der Meßreihe der Luftpyknometermethode 3,5 %. Die Abweichung der Bestimmungen mit dem Luftpyknometer von der Bestimmung aus Volumen, Gewicht und angenommener Dichte (2,65) beträgt jedoch nur 1,4 %. Da sowohl die Bestimmung aus Gewicht und Dichte mit dem angenommenen spezifischen Gewicht arbeiten, liefert die Pyknometermethode den genaueren Wert.
Die Pyknometermethode ist damit den anderen Methoden vorzuziehen. Bei Verwendung des Luftpyknometers im Gelände muß ein Fehler berücksichtigt werden, der von der wahren Dichte des untersuchten Sediments abhängt.

2.4 Die Messung der Durchlässigkeit

2.4.1 Übersicht über die verschiedenen Verfahren

Ist die Messung des Porenanteils verhältnismäßig einfach, so ist die befriedigende Messung der Durchlässigkeit um so komplizierter, wie aus der Diskussion der Theorie hervorgeht. Die Verfahren der Durchlässigkeitsmessung lassen sich in vier Gruppen unterteilen:

a) Die Ermittlung mit Durchflußmessungen im Labor an kleinen Proben des zu untersuchenden Sediments;
b) die rechnerische Ermittlung über die Bestimmung der Korngrößenverteilung, des Porenanteils und der inneren Oberfläche;
c) die Ermittlung im Gelände durch Zugabe oder Entnahme von Wasser in Brunnen;
d) die direkte Messung von Filtergeschwindigkeiten durch Tracer in Brunnen.

Die unter c) und d) erwähnten aufwendigen Methoden entfallen für die Bestimmung der Durchlässigkeit bei hydrogeologischen Kartierungen, da zu ihrer Durchführung fertige Brunnen oder Bohrlöcher vorhanden sein müssen. Zwar werden zur Voruntersuchung die bereits vorhandenen Brunnen mitverwandt, vor allem wenn ein Pumpversuch gefahren wurde, so daß man die Durchlässigkeitswerte den Aufzeichnungen entnehmen kann. Für viele Teile des zu untersuchenden Gebietes ist man jedoch auf eigene Untersuchungen angewiesen, so daß man die unter a) oder b) angeführten einfacheren Methoden zur Berechnung der Durchlässigkeit anwenden muß.

Im Labor werden Durchlässigkeitswerte von festen oder lockeren Gesteinen an kleinen Stichproben untersucht, die nach seitlichem Einspannen von unten nach oben oder umgekehrt von einer Flüssigkeit oder einem Gas durchströmt werden. Bei allen Verfahren sind stationäre Strömung und laminares Fließen Voraussetzung, wenn man die Durchlässigkeit nach der linearen Formel von *Darcy* berechnen will. Im Falle des strömenden Mediums Luft erhält man unter Berücksichtigung der Viskosität direkt das Ergebnis in Darcy (cm^2).

Sedimente großer Durchlässigkeit werden mit einer Stützschicht aus Draht und gröberen Filterkorn versehen, damit die Probe sich nicht während des Versuches auflöst. Aus einem Wassergefäß, dessen Spiegel durch einen Überlauf konstant gehalten wird, wird über einen Schlauch von unten oder von oben Wasser mit einer meßbaren Druckdifferenz durch die Probe gedrückt und in einer Mensur aufgefangen.

Mit den Werten: q = Durchflußmenge in cm^3 pro Zeiteinheit t in s
l = Länge der durchströmten Probe in cm
F = Querschnittsfläche der Probe in cm^2
H_W = angewandte Druckhöhe in cm Wassersäule

läßt sich der Durchlässigkeitsbeiwert k errechnen nach der Formel:

$$k = \frac{q\ (cm^3/s) \cdot l\ (cm)}{F\ (cm^2) \cdot H_W\ (cm)} \quad (cm/s). \qquad (16)$$

Da in der Hydrogeologie mit m/s gerechnet wird, muß das Ergebnis mit 100 multipliziert werden.

Bei nicht zu durchlässigen Böden wird auf den mit Sieben abgeschlossenen Probenbehälter ein Standrohr aufgesetzt und aus dem absinkenden Spiegel des durch die Probe laufenden Wassers der Durchlässigkeitsbeiwert nach *Schultze u. Muhs* (1967, S.424) über folgende Formel errechnet:

$$k = \frac{f \cdot l}{F \cdot t} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (cm/s) \qquad (17)$$

Hierin bedeuten: f = der Querschnitt des Standrohres
H_1 = Wasserspiegelhöhe zu Beginn der Messung
H_2 = Wasserspiegelhöhe zum Schluß der Messung.

Zur Bestimmung der Durchlässigkeiten bei Böden mit sehr großem Tongehalt wird ein Gerät nach *Naujoks* (1959) verwendet. Es arbeitet nach dem Prinzip der vorher beschriebenen Geräte, besitzt aber zusätzlich eine Vorrichtung zur Erzeugung hoher Drücke. Auf die Methode Gas als strömendes Medium zu verwenden, wobei man die Gesteinkonstante K erhält, gemessen in Darcy, wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

2.4.2 Angewandte Verfahren

a) Permeameter nach *Tunn*

Für vorliegende Arbeit wurde ein Verfahren angewandt, das Gas als strömendes Medium verwendet (*Müller, G.* 1964, S.264). Die hierfür nötige Apparatur ist auf Abb. 8 dargestellt. Hierbei wird eine Gesteinsprobe seitlich eingespannt und von unten nach oben mit Luft unter einem bestimmten Druck durchströmt. Anschließend wird das Gas durch verschieden kalibrierte Röhrchen geleitet, die aus einer Gummiblase voll Seifenlauge mit einer Seifenhaut versehen werden. Das strömende Gas treibt die Haut mit einer Geschwindigkeit vor sich her, die dem Durchfluß in der Zeiteinheit entspricht. Beim passieren der Meßmarken in den kalibrierten Röhren wird mit einer Stoppuhr die Zeit gemessen, um die Menge q zu erhalten. Die Berechnung der Durchlässigkeit erfolgt dann nach der Formel:

$$K = \frac{\eta\,(g/cm \cdot s) \cdot l\,(cm) \cdot q\,(cm^3)}{F\,(cm^2) \cdot \Delta p\,(atm) \cdot t\,(s)} \quad (cm^2) \qquad (18)$$

wobei:

η = dynamische Viskosität, hier für Luft
Δp = an die Probe gelegte Druckdifferenz
K = Gesteinskonstante, unabhängig vom strömenden Medium

ist.

Das Gerät wird nach *Müller* (1964) in der Erdölindustrie in Deutschland verwendet. Es hat den großen Vorteil, daß durch die mögliche Variation von Luftdrücken von 0,002 bis 0,1 atm und die verschiedene Kalibrierung der Meßröhren von 4 cm^3 bis 100 cm^3 sehr unterschiedliche Durchlässigkeitswerte erfaßt werden können (von 10^3 Darcy bis wenigen Millidarcy). Wei-

ter spricht für dieses Gerät, daß eine Trocknung von festen oder nicht bindigen Sedimenten keine Schwierigkeit bereitet, wogegen eine vollständige Sättigung mit Wasser nicht zu erreichen ist.

Da dieses Gerät ursprünglich für Festgesteine konstruiert war mußte für diese Arbeit erst eine Probenhalterung für Lockersedimente angefertigt werden. Der entscheidende Nachteil für Untersuchungen an Lockersedimenten liegt darin, daß die Probenahme keine ungestörten Proben liefert. Wenn diese Proben auch noch aus den Stechzylindern herausgeholt werden müßten, um in das Gerät eingebaut zu werden, wäre der Fehler noch größer. Die Probenhalterung wurde also so ausgelegt, daß die Proben mit dem Stechzylinder eingespannt werden können. Bei der Beteiligung von schluffigen und tonigen Anteilen - wie bei den meisten Proben der Molasse gegeben - ist die Gefahr groß, daß beim Trocknen Risse auftreten. Die Untersuchungen wurden deshalb an naturfeuchten Proben durchgeführt und haben damit einen Fehler, der je nach Größe des Wassergehaltes schwankt. Bei feinkörnigen Schluffen dürfte mit dieser Methode jedoch die Differenz zwischen mit Wasser gemessener Durchlässigkeit und mit Gas gemessener Durchlässigkeit aufgehoben sein s.S. 11.

Da die Proben alle bei trockener Witterung entnommen wurden, waren die natürlichen Wassergehalte gering. Das Wasser wird sich auf Grund der kapillären Saugspannung und der Adsorptionskräfte nur in den kleinsten Winkeln der Poren oder als sehr dünne Schicht auf den Kornoberflächen befinden und damit die Durchlässigkeit wenig beeinflussen. Die Ergebnisse sind auf Tabelle 4 zusammengestellt.

b) Wasserpermeameter

Für die Messung von Durchlässigkeitsbeiwerten wurde in der Werkstatt des Instituts für Mineralogie der F.U. Berlin von Herrn *Mädger* ein Gerät nach eigenen Angaben angefertigt (s.Abb. 9).

Es besteht aus zwei Deckeln mit Dichtungsringen und Bohrungen für Wasserzufluß und Piezometerröhrchen, die so über den Zylinder geschraubt werden, daß das Wasser ungehindert durchströmen kann. In den Deckeln befinden sich das Drathsieb und die Filterschicht, die verhindern sollen, daß die Probe ausgespült wird. Die Piezometer dienen dazu, die im strömenden Wasser auftretende Druckdifferenz in größtmöglicher Nähe vor und hinter der Probe zu erfasssen, und damit Fehler auszuschalten, die durch Reibungswiderstände in den Rohrleitungen hervorgerufen werden.

Um stationären Fluß zu erhalten, werden zwei Gefäße mit Überlauf benötigt, die den Wasserspiegel konstant halten. Weiterhin braucht man ein Stativ mit Klemmen zum Einstellen der unterschiedlichen Wasserspiegel und eine Mensur zum Auffangen des durchströmenden Wassers.

Wie ein Vorversuch ergeben hatte, ist die Verwendung von entlüftetem Wasser unbedingt erforderlich, um einen konstanten Durchlässigkeitswert zu erhalten. Bei Verwendung von Leitungswasser ergab sich Abnahme des Durchlässigkeitsbeiwertes von $2{,}6 \cdot 10^{-4}$ bis auf $2{,}0 \cdot 10^{-5}$ m/s für die gleiche Probe über einen Versuchszeitraum von 3 Tagen.

Von großer Wichtigkeit ist auch das Problem der Sättigung der Proben mit Wasser. Wenn man mit einer Wasserstrahlpumpe an die Zylinderprobe einen Unterdruck legt, um die in den Poren befindliche Luft vorher abzusaugen, kann das nachfolgende Wasser das im Zylinder befindliche Sediment hinaustreiben. Dies ist besonders dann der Fall, wenn die stützende Filterschicht oberhalb und unterhalb der Probe nicht fest genug an der Quer - schnittsfläche anliegt. Trotz dieser Vorsichtsmaßnahmen konnte eine grundbruchartige Zerstörung der Proben manchmal nicht verhindert werden.

Die Berechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte erfolgte nach der Formel (16), wobei die Druckhöhe H_W als Wasserstandsdifferenz der beiden Piezometerrohre abgelesen wurde. Die Meßergebnisse sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

c) Ermittlung der Durchlässigkeit über die Korngröße, den Porenraum und die innere Oberfläche

Nach *Hazen* (1895) hängt die Durchlässigkeit eines Lockersedimentes von einer bestimmten Korngröße und einem Faktor C ab. Die Korngröße wird mit d_{10}^2 angegeben (d_{10} bedeutet hier den Durchmesser der Kornfraktion bei welchem die Siebsummenlinie die 10 %-Linie schneidet). Die weiteren Forschungen ergaben, daß nicht die Größe d_{10}^2 sondern eine „wirksame Korngröße" maßgeblich sei. Sie ist in der Bodenkunde definiert als $d_W = 6/\sigma$, wobei σ (cm^2/cm^3) die spezifische Oberfläche bedeutet.

Da die Ermittlung der wirksamen Korngröße sehr viel schwieriger ist als die Ermittlung von d_{10}, hat *Beyer* (1964) versucht, eine Abhängigkeit zwischen d_W und d_{10} zu ermitteln. Das Vorhanden sein einer derartigen Beziehung ist zu erwarten, da beide Größen eine gleichsinnige Veränderung erfahren, wenn das Sediment größer oder feinkörniger wird. Nach der Bestimmung der Werte d_W und d_{10} ordnete er die verschiedenen Proben in engstufige Ungleichförmigkeitsgrade, wobei der Ungleichförmigkeitsgrad U als d_{60}/d_{10} definiert ist. Nach Eintragen der Werte in ein Koordinatensystem mit der Ordinate d_{10} und der Abszisse d_W zeigte sich eine Abhängigkeit mit relativ geringen Streubereichen. Bei einer Einteilung der Ungleichförmigkeitsgrade in Stufen von

$U = 1{,}0 - 1{,}9$
$U = 2{,}0 - 2{,}9$
$U = 3{,}0 - 4{,}9$
$U = 5{,}0 - 9{,}9$
und $U = > 10$

zeigte es sich, daß sämtliche Steigungsgeraden flacher als 45° verlaufen; d.h. einem bestimmten Wert von d_{10} ist eine wirksame Korngröße d_W zugeordnet, deren absoluter Wert größer ist als derjenige von d_{10}. Auf Grund dieser Untersuchung kann bei Kiesen und Sanden mit einer Beziehung zwischen wirksamer Korngröße d_W und d_{10} in Abhängigkeit von U gemäß folgender Tabelle gerechnet werden:

$U = d_{60}/d_{10}$ (Bereich)	$n = d_w/d_{10}$ (Bereichswerte)	$n = d_w/d_{10}$ (Mittelwert)
1,0 - 1,9	1,0 - 1,6	1,4
2,0 - 2,9	1,6 - 1,9	1,8
3,0 - 4,9	1,9 - 2,2	2,1
5,0 - 9,9	2,2 - 2,5	2,3
> 10	> 2,5	> 2,5

Diese Gesetzmäßigkeit wurde durch *Beyer* (1964) an mehr als 500 Vergleichsuntersuchungen festgestellt. Um aus der Formel von *Hazen*

$$k = C \cdot d_w^{\,2} \qquad (19)$$

die Durchlässigkeit berechnen zu können, muß noch der Faktor C bestimmt werden. *Beyer* (1964) fand nach statistischen Vergleichsmessungen für verschiedene Ungleichförmigkeitsgrade folgende Mittelwerte:

U (Bereich)	C (Bereichswerte)	C (Mittelwert)
1,0 - 1,9	$(120 - 105) \cdot 10^{-4}$	$110 \cdot 10^{-4}$
2,0 - 2,9	$(105 - 95) \cdot 10^{-4}$	$100 \cdot 10^{-4}$
3,0 - 4,9	$(95 - 85) \cdot 10^{-4}$	$90 \cdot 10^{-4}$
5,0 - 9,9	$(85 - 75) \cdot 10^{-4}$	$80 \cdot 10^{-4}$
10,0 - 19,9	$(75 - 65) \cdot 10^{-4}$	$70 \cdot 10^{-4}$
> 20	$65 \cdot 10^{-4}$	$60 \cdot 10^{-4}$

Wenn man die Ungleichförmigkeitsgrade gegen die wirksamen Korndurchmesser aufträgt, kann man nach *Beyer* die zugehörigen Durchlässigkeitswerte aus der so entstehenden Tabelle ablesen. Nach dieser Methode wurden die durch die anderen Methoden nicht zerstörten Proben auf den Durchlässigkeitswert untersucht. Die Ergebnisse sind der Tabelle 4 und der Abb. 10 zu entnehmen.

Beruht die Methode nach *Beyer* weitgehend auf statistisch ermittelten Werten, so erhebt der methodische Ansatz von *Kozeny u. Carman* (in Carman 1956) mehr Anspruch auf allgemeine Gültigkeit. Danach ist das Verhältnis der inneren Oberfläche zum Porenanteil - zusammen mit einem Faktor, der die Kornform berücksichtigt - ein Maß für die Durchlässigkeit eines Lockergesteins, sofern die Einzelkörner punktförmig aneinandergrenzen und die Körner Kugelform haben

$$k = \frac{\epsilon^3}{5\,(1 - \epsilon)^2\, S_o^{\,2}} \qquad (20)$$

Es bedeuten hier ϵ = Porosität nach *v.Engelhardt*
S_o = die spezifische Oberfläche der festen Substanz

Die spezifische Oberfläche eines Korngemisches wird nach *v.Engelhardt* (1960, S.84 verändert) folgendermaßen berechnet:
Ist n_e die Zahl der in 1 cm^3 Feststoffvolumen des Bodens enthaltenen Körner vom Radius r_e, so gilt für den volumenmäßigen Anteil G_e dieser Körnerklasse am gesamten Teil

$$G_e = \frac{4\,\pi\ r_e^3\ n_e}{3} \qquad (21)$$

Für die gesamte Obefläche S aller in 1 cm^3 Feststoffvolumen enthaltenen Körner mit den Radien $r_1, r_2, \ldots r_e$ gilt

$$S = 4\,\pi\,(n_1 r_1^2 + n_2 r_2^2 \ \ldots + n_e r_e^2) \qquad (22)$$

dafür kann man schreiben

$$S = w\,(\frac{G_1}{r_1} + \frac{G_2}{r_2} \ldots + \frac{G_e}{r_e}) \qquad (23)$$

mit dem Kornfaktor $w \geqslant 3{,}0$.
Die spezifische Oberfläche erhält man, wenn man die obenberechnete Oberfläche durch das Gesamtvolumen teilt.

Nach *v.Engelhardt u. Pitter* (1951, S. 477) ergab sich bei einem Wert von 3,5 für den Kornfaktor w in einem pleistozänen Sand eine gute Übereinstimmung der Durchlässigkeitswerte mit anderen Versuchen. Ein Vergleich der verschiedenen Formeln zur Bestimmung der Durchlässigkeit aus Kornoberfläche und Porenraum findet sich bei *Köhler* (1965).

In dieser Arbeit wurden die gleichen Proben die nach der Methode von *Beyer* (1964) untersucht wurden auch nach der o.a. Methode mit Hilfe eines Tischrechners untersucht. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4 und der Abb. 10 zusammengefaßt worden.

Die Messung der Durchlässigkeit nach *Beyer* und nach *Kozeny u. Carman* konnte nur an den Proben vorgenommen werden, die bereits die Messungen im „ungestörten" Zustand vollständig überstanden hatten. Proben, die z.B. während der Messung der Durchlässigkeit mit Wasser, Ausspülungen vom Feingehalt oder gar Grundbruch zeigten, fielen deshalb für die weiteren Messungen aus. Die ausgespülten Anteile der Proben konnten während der Durchlässigkeitsmessung nicht aufgefangen werden.

Zunächst wurden mit einer Siebmaschine (Haver & Boecker EML) die Proben ohne erkennbaren Gehalt an Bestandteilen mit einem Durchmesser unter 0,06 mm gemäß der DIN 18123 trocken gesiebt. Die Proben mit erkennbarem Feingehalt wurden naß gesiebt und nachher durch eine Schlämmanalyse im Atterbergzylinder mit dem Aräometer auf den Anteil an Bestandteilen mit dem Durchmesser unter 0,06 mm untersucht.

Die Ergebnisse wurden auf dem Formblatt „Körnungskurve" als Kornsummenlinie zusammengefaßt und dargestellt (s.Abb. 10). Aus dieser Abbildung ist zu entnehmen, daß es sich bei den untersuchten Sedimenten um Mittel- hauptsächlich aber Feinsande handelt. Der Gehalt an Korn mit einem Durchmesser kleiner als 0,06 mm steigt dabei kontinuierlich von wenigen Prozent bis beinahe 40 Prozent.

Wie aus Abb. 11 zu entnehmen ist, liegen die verwendeten Methoden in ihren Ergebnissen jedoch beträchtlich auseinander. Während die Werte der Methode von *Beyer* noch um die Werte der Luft- und Wasserdurchlässigkeitsmessungen herumpendeln, fallen die Werte nach der Methode *Kozeny u. Carman* vollständig aus dem Rahmen.

2.4.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit sind zusammengefaßt auf der Tabelle 4 und der Abbildung 11 dargestellt worden. Besonders aus der Abbildung ist der krasse Unterschied zu erkennen. Hier sind die einzelnen Messungen nach steigender Durchlässigkeit (Meßverfahren mit Luft) geordnet aneinandergereiht worden. Anschließend wurden für die gleichen Proben die Ergebnisse der Messung mit Wasser und die der Berechnung über die Korngröße nach *Beyer* sowie der Berechnung über die innere Oberfläche und den Porenanteil nach *Kozeny u. Carman* zugeordnet. Das Kurvenbild zeigt danach zwischen den einzelnen Verfahren Unterschiede von mehr als einer Zehnerpotenz an.

Da der Durchlässigkeitswert in die Formel zur Berechnung vom Durchfluß linear eingeht, bedeutet ein Unterschied von einer Zehnerpotenz einen Fehler von 1 000 %, der die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Wasserversorgungsanlage auf Grund solcher Messungen durchaus fragwürdig macht. Wie aus den methodischen Erläuterungen und der Diskussion der Probenentnahme hervorgeht, ist eine Fehlerrechnung wenig sinnvoll, da in sie viele nicht meßbare Faktoren eingehen müßten. So ist es z.B. unmöglich, mit dem Ausstechgerät zwei Proben zu erhalten, bei denen die Gefügeauflockerung den gleichen Wert erreicht.

Auch der Transport vom Entnahmepunkt bis an den Ort der Untersuchung bedeutet eine Fehlerquelle, deren Größe unbekannt ist.
Weiterhin ist die Wassersättigung der Proben ein ungelöstes Problem. Die Verwendung eines Unterdrucks führte in manchen Fällen zur Zerstörung der Probe; die schrittweise Sättigung von unten garantiert andererseits nicht, daß alle Luft aus dem Probenkörper verdrängt wird, wodurch eine Verringerung der Durchlässigkeitswerte eintritt.

Bei der Bestimmung der Durchlässigkeit über die innere Oberfläche und den Porenanteil bleibt ungewiß, wie die einzelnen Körner sich gegenseitig berühren. Daß der Kontakt punktförmig sei, ist vor allem bei bindigen Sedimenten eine Forderung der Theorie. Auch der Kornfaktor ist eine willkürliche Größe, sofern die Körner keine Kugelform besitzen.

Bei der Methode von *Beyer* wird der Porenanteil garnicht berücksichtigt. Das Isotropierproblem konnte durch die waagerechte oder senkrechte Entnahme auch nur vereinfacht berücksichtigt werden. In der Praxis ändert sich die Durchlässigkeit nach allen Raumrichtungen. Als Beispiel seien kreuzgeschichtete Sedimente erwähnt.

Eine weitere Einschränkung der Aussagesicherheit von Durchlässigkeitsmessungen an Einzelproben ist dadurchgegeben, daß die Stichproben durchaus nicht der Gesamtdurchlässigkeit (Transmissivität) eines großen und wechselhaft gefügten Sedimentkörpers entsprechen müssen.

Aus all diesen Einschränkungen ergibt sich, daß die Durchlässigkeitsmessungen nach den o.a. Methoden keine exakten Werte sondern höchstens überschlägige Daten ergeben.

3 Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Versickerungsversuchen im Gelände

Die im Kapitel 2.4.3 festgestellten Fehler bei der Bestimmung von Durchlässigkeitswerten aus Laborversuchen und aus der Kornsummenlinie mit Hilfe des Porenanteils lassen es geraten erscheinen, eine andere Methode zu suchen, die von den o.a. Fehlern weitgehend unabhängig ist und eine möglichst genaue Bestimmung von Durchlässigkeitswerten gestattet. Dabei bietet sich die Möglichkeit an, die Versickerung im anstehenden und damit ungestörten Sediment zu untersuchen. Die Versickerungsvorgänge sind jedoch äußerst kompliziert, wie das folgende Kapitel erläutert.

3.1 Theorie des Infiltrationsvorganges

Viele Autoren aus den Fachgebieten Bodenkunde und Wasserwirtschaft bemühten sich um eine Charakterisierung der Parameter, die die Vorgänge bei der Versickerung von Wasser in den Boden bestimmen.

Einschlägige Literatur ist z.B. den Arbeiten von *Baumgart* (1967), *Rieser* (1969), *Kopp* (1965) sowie für den angelsächsischen Bereich bei *Hillel* (1971) zu entnehmen. Nach *Phillip* (1957), *Swartzendruber* (in *de Wiest* 1969, S. 215) ist die Infiltration oder Versickerung ein Vorgang, den man mit der Diffusion vergleichen kann: Das Wasser dringt nach dem Gesetz der Schwerkraft in den Porenraum ein und wird zudem durch die kapillare Saugspannung in alle Raumrichtungen hineingesogen. Anfangs wird der Infiltrationsvorgang maßgeblich davon beeinflußt, während die Durchlässigkeit eine nur geringe Rolle spielt. Mit zunehmendem Wassergehalt bilden sich vermehrt zusammenhängende wassergefüllte Fließkanäle; dadurch geht die kapillare Saugspannung zurück und der Faktor Durchlässigkeit gewinnt an Bedeutung.

Zur Beschreibung der Vorgänge sei das *Darcy*'sche Gesetz als Potentialgleichung herangezogen:

$$q = - k_{(\psi)} \cdot \nabla H \qquad (24)$$

Der Index ψ deutet auf die Abhängigkeit von der kapillaren Saugspannung hin. ∇H ist wieder der Druckgradient, der in diesem Fall die Gravitationskräfte als positiven Druck und die kapillare Saugspannung als negativen Druck einschließt. Da bei der Versickerung in einen Boden andere Werte gemessen werden als bei der Drainage, muß beachtet werden, daß diese beiden Vorgänge unterschiedlich verlaufen und einen Hysterese-Effekt zeigen. Das Problem ist hier nicht vorhanden, wenn nur Versickerungsvorgänge untersucht werden. Für die zum Vergleich durchgeführten pF - Wertbestimmungen muß es jedoch berücksichtigt werden.

Um die Feldgleichung für Fluß im isopermeablen Raum zu erfüllen, muß die Kontinuitätsgleichung eingeführt werden:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \nabla \cdot q \qquad (25)$$

Aus beiden Gleichungen ergibt sich:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \quad (k_{(\psi)} \nabla H) \qquad (26)$$

θ steht für den Grad der Wassersättigung in Prozent des Porenraumes. Da der gesamte hydraulische Druck sich aus der negativen kapillaren Saugspannung und den Gravitationskräften zusammensetzt, kann man schreiben:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \nabla \cdot [k_{(\psi)} \nabla (\psi - z)] \qquad (27)$$

$$= - \nabla \cdot (k \nabla \psi) + \frac{\partial k}{\partial z} \qquad (28)$$

oder

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial y}\right) + \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} \qquad (29)$$

Um diese Gleichung zu lösen, vereinfacht man sie, indem man sie in eine Form analog der Diffusionsgleichung schreibt. Die Gleichung wird für den horizontalen Fall, d.h. daß die Gravitation vernachlässigt wird, und bei Fluß in eine Richtung mit Hilfe der Methode der Trennung der Variablen (Boltzmann Transformation) gelöst.

Auch für den vertikalen Fall ist von *Phillip* (1957) eine Lösung der Gleichung gegeben worden. Es wird jedoch angeführt, daß zur Lösung dieser Gleichungen die ungesättigte Durchlässigkeit (unsaturated conductivity) und die kapillare Saugspannung (matric suction) gemessen werden müssen.

3.2 Aus der Infiltrationstheorie abgeleitete Methode zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes

Bei der Betrachtung der Infiltrationsvorgänge wird klar, daß sich der von der Sättigung des Porenanteils abhängige Durchlässigkeitsbeiwert zunächst laufend ändert. Die Änderung kann sich aber nur soweit auswirken, wie kapillare Saugspannung und Gravitation im Stande sind, den Porenraum mit Wasser aufzufüllen. Zu diesem Zeitpunkt, wenn der zu untersuchende Sedimentkörper bis auf einen geringen Prozentsatz mit Wasser gesättigt ist, muß die Infiltrationsrate ein Maximum erreichen und konstant bleiben. Gleichzeitig geht die veränderliche kapillare Saugspannung mit fortschreitender Auffüllung des vorhandenen Hohlraumes gegen Null.

Wenn man jetzt - beim Zustand der Wassersättigung - die Vorgänge, die das *Darcy*'sche Gesetz bestimmen, mit der Versickerung in einen Boden vergleicht, erscheint es durchaus möglich, den Durchlässigkeitsbeiwert aus einem Versickerungsversuch zu erhalten.

Wie oben angeführt wurde, benötigt man für die Durchlässigkeitsbestimmung im Labor:

a) Homogenität
b) Isotropie
c) laminaren Fluß
d) stationären Fluß
e) Querschnitt der Probe
f) Länge der Probe
g) Druckdifferenz
h) Sättigung des Porenanteils

Es gilt festzustellen, wie diese Größen bei einem Versickerungsversuch einzusetzen sind.

a) Voraussetzung für den Versickerungsversuch ist, daß man einen Sedimentbereich aussucht (= Prüfvolumen), der als homogen anzusehen ist. Durch Aufgraben mit dem Spaten muß festgestellt werden, wo der Versuch angesetzt werden kann. Hat man eine dem Augenschein nach günstige Stelle gefunden, werden zur Überprüfung Proben für die Kornanalyse genommen. Die homogene Schicht muß mindestens einige dm mächtig sein, was der Höhe des Prüfvolumens entspricht.

b) Da in natürlichen Sedimenten isotrope Verhältnisse selten anzutreffen sind, ist der Durchlässigkeitswert aus der Versickerung als Minimalwert oder auch als Durchlässigkeitswert senkrecht zur Schichtung anzusehen.

c) Der laminare Fluß ist durch die Bedingungen der Porenquerschnittgröße und der *Reynolds*'schen Zahl vorgegeben. Diese Bedingungen sind im Laborversuch und im Feldversuch die gleichen. Es können also auch bei der Versickerung im Feld nur die Korngrößen bis Grobsand untersucht werden, falls in einem gröberen Sediment nicht genügend feines Material die großen Porenquerschnitte verringert. Die untere Grenze des Gültigkeitsbereiches ist ebenso wie die obere Grenze im Laborversuch und im Versickerungsversuch die gleiche.

d) Die Bedingung „stationärer Fluß" ist bei der Versickerung dann gegeben, wenn keine Porenluft mehr vom Wasser verdrängt wird und das Wasser ungehindert nach unten oder nach den Seiten abfließen kann.

e) Die Größe des Querschnitts des Prüfvolumens ist sowohl im Versickerungsversuch wie im Laborversuch eindeutig bestimmt. Sie wird im Feldversuch durch die Begrenzung des Versickerungszylinders an der Sedimentoberfläche angegeben und mit dem Abstand l, der Höhe des Prüfvolumens, nach unten projiziert.

f) Die Länge der Probe ist im Versickerungsversuch nicht eindeutig definiert. Nach den Versuchen von *Baumgart* (1969, S.46) sind in einer homogenen Sandschicht unter einer Versickerungsfläche nahezu parallele Stromlinien im abwärts gerichteten Wasserstrom nachgewiesen (s.Abb. 12). Werden nun die Stromlinien an einer undurchlässigeren Schicht abgelenkt, so kann nur die obere Hälfte der zu untersuchenden Schicht als Probenlänge verwendet werden. Ist die untere Schicht durchlässiger als die zu untersuchende, so ist ein Ausweichen der Stromlinien nicht zu befürchten, und man kann die ganze Mächtigkeit der Schicht als Probenlänge einsetzen. Damit sind die Ausmaße des im Versickerungsversuch ungestörten Prüfvolumens als gedachter Zylinder unter der runden Infiltrationsfläche festgelegt.

Zur Sicherung des eigenen Geländeversuches wurde durch Siebanalysen die Homogenität des Sedimentes im Prüfvolumen nachgewiesen.

g) Die Druckdifferenz ergibt sich aus der Höhe des Prüfvolumens und der Wassersäule, die als Überstau oberhalb der Probe steht.

h) Der Durchlässigkeitswert als Gesteinskonstante gilt wie o.a. nur im luftfreien Zweistoffsystem Sediment und Wasser. Da diese Sättigung selbst im Labor nur schwierig zu erreichen ist, wird sie im Feldversuch erst recht nicht erreicht werden können.

Nach *Hillel* (1971, S.134) ist bei der Versickerung in der „Transmissionszone", d.h. in der Zone zwischen der ersten sehr gering mächtigen „gesättigten" Schicht unter der Versickerungsfläche und der darunter folgenden Benetzungsfront eine gleichmäßige Sättigung des Porenanteils von ungefähr 80 bis 90 % zu erwarten. Es kann also aus der Versickerung nur ein Durchlässigkeitswert gemessen werden, der entsprechend dem Restluftgehalt geringer ist als der maximale Wert.

Nach diesen Überlegungen wird der Durchlässigkeitswert einer vorher ausgewählten homogenen Sedimentschicht dadurch bestimmt, daß man nach Erreichen einer konstanten Infiltrationsrate in einen zylindrischen Probenkörper, der unter der Versickerungsfläche angenommen wird, das lineare Gesetz von *Darcy* anwendet (Abb. 12).

Die Versuchsbedingungen wurden durch die Bestimmung des Wassergehalts in situ mit einer Neutronensonde, die Bestimmung der kapillaren Saugspannung durch pF-Bestimmungen an hinterher genommenen Proben sowie eine Kornanalyse über das Versickerungsprofil und Vergleichsmessungen im Labor kontrolliert.

3.3 Methoden zur Kontrolle des Versickerungsvorganges

3.3.1 Anwendung der Neutronensonde zur Kontrolle der Wassersättigung

Um die unter 3.2 angenommenen Verhältnisse bei einer Versickerung zu überprüfen, wurde eine Neutronensonde der Bauart „Labor. Prof. Dr. Berthold" verwendet. Nach *Osthoff* (1969, S.45 ff.) sind andere Methoden zur Feuchtemessung wie Probenahme und Ofentrocknung, Rillenbo[illegible] CM-Gerät sowie Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit und Photoabsorption wegen zu großer Zerstörung des Probenkörpers und Beeinflussung durch störende Faktoren, wie z.B. den Jonengehalt des Wassers, für eine zutreffende Bestimmung des Feuchtegehalts weniger geeignet. Seit etwa 20 Jahren wird nach den Untersuchungen von *Blecher, Cuykendall u. Sack* (1950) und *Gardner u. Kirkham* (1952) mit Hilfe von Neutronensonden die Anzahl von Wasserstoffatomen in einem Umkreis von 25 cm von der Strahlungsquelle bestimmt.

Die Neutronenquelle besteht aus einem radioaktiven Element, das α-Strahlen emittiert, die aus metallischem Berylliumpulver Neutronen freisetzen nach der Gleichung:

$$ {}^{m}_{k}E + {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{1}_{o}Nn + {}^{m+3}_{k+2}E \qquad (30) $$

In der hier verwendeten Sonde wird als Neutronenerzeuger ein Americium-Beryllium - Präparat verwendet.

Die emittierten Neutronen werden nach dem Gesetz des elastischen Stoßes von Wasserstoffatomen, die die gleiche Masse haben, abgebremst. Die gebremsten Neutronen werden in einem Scintillationskristall über dem Strahler registriert und nach Verstärkung auf einem Tonband gespeichert. Zur Auswertung werden die Impulse des Tonbandes linearisiert und auf einem y-t-Registriergerät als Wassergehalt pro Gesamtvolumen ausgeschrieben (s. Abb. 14 + 15).

Die Neutronensonde wurde im Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes, Berlin-Dahlem zur Aufnahme von Feuchteprofilen umkonstruiert *(Aurand, Beckmann u. Kasiske 1967)*, die Linearisierung wurde von Herrn Ing.grad. Schumann im selben Hause gebaut.

Nach *Buchmann* (1969, S.111 f.) ist die Zuverlässigkeit der Neutronensonde für die Messung absoluter Wassergehalte nicht sehr hoch. Die Gründe hierfür sind folgende:

Andere Atome üben einen, wenn auch geringen Einfluß auf die Ergebnisse aus.

Die Eichung des Herstellers stimmt nicht mit eigenen Versuchen überein.

Unterschiedliche Dichten der verwendeten Versuchsböden gehen in die Messungen mit unterschiedlichen Ergebnissen ein.

Für Differenzmessungen im selben Untersuchungsobjekt wird jedoch nur ein Fehler von 1 - 2 % angegeben.

Um zu gewährleisten, daß die Genauigkeit der Sonde nicht zeitlichen Veränderungen unterliegt, wird vor jeder Messung eine Eichung vorgenommen, indem man den Feuchtewert der Abschirmung aufnimmt, die der Sonde als Transportbehälter dient. Die Abschirmung besteht aus einer definierten Menge Paraffin in einem Stahlbehälter, aus der man den entsprechenden Wassergehalt berechnen kann.

Bei der oben beschriebenen Versuchsanordnung ist der absolute Wassergehalt nicht ausschlaggebend. Wichtig ist nur, daß aus der Feuchtemessung der Zeitpunkt bestimmt werden kann, an dem keine Zunahme des Wassergehalts mehr zu beobachten ist. Zu diesem Zeitpunkt kann dann eine stationäre Strömung angenommen und die lineare Gleichung nach *Darcy* angesetzt werden.

3.3.2 Bestimmung des pF-Wertes zur Kontrolle der kapillaren Saugspannung

Wasser hat unter einer geschlossenen Oberfläche auch im porösen Medium (z.B.Grundwasserspiegel) einen positiven Druck, bedingt durch Gravitation und Masse.

An der Oberfläche des Wasserspiegels ist der Druck gleich null, während das Wasser, das in Kapillaren über den geschlossenen Spiegel ansteigt, einem negativen Druck unterliegt, der ein Maß für die kapillare Saugspannung darstellt. Die kapillare Saugspannung resultiert aus der Oberflächenspannung des Wassers und dem Berührungswinkel des Wassers mit der Kapillarenoberfläche. Im porösen Medium eines Lockersedimentes muß zusätzlich die Adsorption berücksichtigt werden, die eine Hydrathülle um die einzelnen Par-

tikel ausbildet. Die Adsorptionskräfte sind bei Sand- und Kiessedimenten auf Grund der geringen inneren Oberfläche vernachlässigbar klein.

Nach *Hillel* (1971, S.57) stehen die Kapillarkräfte immer in Wechselwirkung mit den Sorptionskräften. Er schlägt daher für den gesamten negativen Druck den Terminus „matric suction" vor, der beide Größen berücksichtigt.

Für die hier untersuchten Versickerungsvorgänge genügt es, die kapillare Saugspannung zu betrachten, da in naturfeuchten Sedimenten die Hydrathülle immer ausgebildet ist und nur das Zurückgehen der kapillaren Saugspannung gegen null bei fortschreitender Sättigung beobachtet werden soll. Als Maßeinheit für die kapillare Saugspannung werden ebenso wie bei positivem Druck die Atmosphäre oder Zentimeter Wassersäule verwandt. Da die kapillare Saugspannung über einen Bereich von mehreren Zehnerpotenzen gemessen werden kann, ist von *Schofield* (1935, zit. in *Hillel* 1971) vorgeschlagen worden, analog der Aziditätsskala „pH" den Begriff „pF" anzuwenden.

Danach ist pF der Logarithmus des negativen Drucks der kapillaren Saugspannung, gemessen in cm Wassersäule. Das heißt, daß pF^1 einer kapillaren Saugspannung von 10 cm Wassersäule entspricht, pF^3 einer solchen von 1000 cm. Die Messung der kapillaren Saugspannung erfolgt einmal mit einem Tensiometer. Nach dieser Methode wird eine poröse Tonzelle mit Wasser gefüllt und an ein Gefäß mit Quecksilber angeschlossen (s.Abb.16). Die Tonzelle wird mit dem zu untersuchenden Sediment in guten Kontakt gebracht, so daß durch die kapillare Saugspannung Wasser aus der Tonzelle herausgesogen wird. Proportional dazu wird das Quecksilber in die mit einer Kalibrierung versehene Röhre hineingesogen, der pF-Wert in mm Quecksilbersäule abgelesen und auf cm Wassersäule umgerechnet. Nach *Hillel* ist diese Methode beschränkt auf pF-Werte unter 3, weil Wassersäulen in makroskopischen Systemen Drücken über einer Atmosphäre nicht mehr standhalten. Da für die folgenden Versuche interessiert, ob die kapillare Saugspannung im Sediment bei Überstau gegen null geht, werden nur die kleinsten pF-Werte benötigt. Daher ist das Gerät für die Zwecke dieser Arbeit besonders geeignet.

Für den auslaufenden (drainenden) Fall ist von *Wolkewitz* (1959, S.43 f.) eine Meßmethode ausführlich dargestellt worden. Der auf S.29 erwähnte Hysterese-Effekt äußert sich bei dieser Methode derart, daß die niedrigsten pF-Werte überhaupt nicht mehr gemessen werden können. Die Methode wurde zwar auf die Sedimente angewandt, kann aber hier nicht verwendet werden (s.Abb.16).

3.4 Durchführung des Versickerungsversuchs mit der Neutronensonde

Als Untersuchungsobjekt wurde eine Sandgrube in Berlin-Wannsee unmittelbar neben der Großdeponie der Berliner Stadtreinigung ausgewählt. Hier ist auf einem größeren Areal eine Wechsellagerung von Feinsand und Mittelsand zu finden, die als fluvioglaziales Produkt der Wechseleiszeit angesehen wird.

Mittels Grabungen wurde ein Punkt ausgewählt, der unter einer ca. 10 cm mächtigen, durch Fahrzeuge aufgewühlten Sandschicht einen 85 cm mächtigen hellgraugelben, schwach kreuzgeschichteten, kaum schluffhaltigen Sand aufwies. Dieser Sand konnte als weitgehend homogen angesehen werden. Mit deutlichem Farbunterschied folgt zum Liegenden ein etwas braunerer, schluffhaltiger Feinsand. Die Kornanalyse ergab die in Abb. 17 dargestellten Summenkurven. Sie zeigen, daß die untersuchte Schicht in ihrer Korngrößenverteilung und Sortierung sehr homogen ist; auch der Unterschied zur liegenden Schicht wird durch den Schluffanteil um 20 % unterstrichen.

An dieser Stelle wurden mit Hilfe eines Maschinenhammers in Abständen von 35 cm drei nahtlose Stahlrohre mit angeschweißter Spitze von 50 mm Durchmesser und 2,5 m Länge rund 2 m tief in das Sediment getrieben (s.Abb. 14). Obwohl durch das Rammen eine Verdichtung des Sediments zu erwarten ist, wurde der Rammung Vorzug vor einer Bohrung gegeben, um zu verhindern, daß an der Außenwand der in vorher gebohrte Löcher eingebrachten Rohre das einsickernde Wasser falsche Ergebnisse der Durchlässigkeitsmessung vortäuscht.

Die Zone der Verdichtung ist beim Aufgraben nach dem Versuch deutlich zu erkennen gewesen; sie kann aber bei der Größe des betrachteten Versickerungsvolumens vernachlässigt werden.

Von den drei in Linie eingerammten Rohren wurde ein äußeres Rohr als Achse des gedachten Versickerungszylinders (=Prüfvolumen) angesehen. Um dieses Rohr wurde der Begrenzungsring von 70 cm Durchmesser aus verzinktem Eisenblech 4 cm tief in den Sand gedrückt. Neben den Versickerungsring wurden zwei PVC-Flaschen von je 60 l Inhalt auf einen Bock gestellt. Die Flaschen sind in einhalb Liter Abständen graduiert und haben an der untersten Markierung einen Ausflußhahn. Über einen PVC-Schlauch wurde das Wasser zu einer an der Wand des Versickerungsringes befestigten Auslaßvorrichtung geführt, die von einem Schwimmer so reguliert wird, daß über die ganze Versuchsdauer ein gleichmäßig hoher Wasserüberstau von 4 cm eingehalten werden konnte.
Während des Versuches war jedes Bohrloch ohne Störung der Versickerung für die Neutronensonde erreichbar. Vor Versuchsbeginn wurde in allen drei Rohren eine Bestimmung der Ausgangsfeuchte vorgenommen. Der Zeitbedarf für die Feuchtemessung in einem Rohr betrug 10 Minuten.
Die gleichmäßige Wasserversorgung wurde durch die abwechselnde Benutzung der Wasserflaschen sichergestellt. Nach der Anfangsfüllung wurden die Uhrzeit notiert und in möglichst rascher Folge die Feuchteprofile in den drei Rohren von innen nach außen aufgenommen. Die verbrauchte Wassermenge pro Zeiteinheit ist jeweils beim Wechsel von einer Wasserflasche zur anderen notiert worden. Nach dem dritten Meßdurchgang wurden die Zeitabstände vergrößert und jede Stunde die drei Profile aufgenommen. Insgesamt betrug die Versuchsdauer 10 Stunden, wobei 12 mal die drei Rohre gemessen wurden. Dabei wurden zusammen 540 Liter Wasser verbraucht (s.Abb. 18 a u. b).
Im vorliegenden Fall ist die Berechnung mit der Höhe des Prüfvolumens

von 40 cm vorgenommen worden, weil die liegende Schicht undurchlässiger ist als die zu untersuchende Schicht. Aus den Feuchteprofilen geht hervor, daß die Sättigung bei einem Versickerungsbeginn um 12.30 h gegen 17.00 h erreicht wurde (s.Abb. 18 a u. b).
Zwischen 17.03 h und 18.04 h versickerten dann 60 Liter.
Die Druckhöhe setzt sich zusammen aus der Höhe des Prüfvolumens und 4 cm Überstau gleich 44 cm Wassersäule. Eingesetzt in die Formel

$$k = \frac{q \cdot l}{F \cdot H_W} \qquad (31)$$

ergibt sich für den Durchlässigkeitswert

$$k = \frac{60\,000\ cm^3/3660\ s \cdot 40\ cm}{7693\ cm^2 \cdot 44\ cm} \quad (cm/s)$$

$$= 5 \cdot 10^{-3}\ cm/s \quad \text{oder} \quad 5 \cdot 10^{-5}\ m/s$$

3.5 Vergleichsuntersuchungen an Laborproben

Zur Überprüfung des Versickerungsversuches wurde am nächsten Tag mit den üblichen Ausstechzylindern das Vertikalprofil über eine Teufe von 2 m durch 14 Zylinder beprobt und zur Untersuchung in das Labor gebracht.

Nach der Trocknung im Trockenschrank bei 105°C wurde auf dem S.20 beschriebenem Wege der Porenraum bestimmt. Sodann wurde der Durchlässigkeitsbeiwert wie auf S.22 angegeben im Wasserpermeameter bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6 zu entnehmen. Während die Werte für die hangende Feinsandschicht sehr gleichwertig sind, streuen sie für die liegende Schicht beträchtlich. Es überrascht dabei, daß die liegende Schicht mit ihrem Schluffanteil von 20 % in ihren Durchlässigkeitswerten nur um rund eine halbe Zehnerpotenz niedriger liegt als die hangende Schicht.

Im Anschluß an die Durchlässigkeitsmessungen im Wasserpermeameter sind die Proben wieder getrocknet worden: danach erfolgte die Bestimmung des pF-Wertes mit dem Tensiometer. Die poröse Tonzelle wurde in ein vorgebohrtes Loch bis zur Hälfte in den Probenzylinder gesteckt und vorsichtig angedrückt, um einen guten Kontakt mit dem zu untersuchenden porösen Material herzustellen. Nach 15 Minuten wurde eine kapillare Saugspannung von 65 mm Quecksilbersäule gemessen, nach 20 Minuten 75 mm. Dann wurden in 5-minütigen Abständen jeweils 100 ml Wasser zugegeben und nach mutmaßlicher Auffüllung des Porenanteils, wie im Feldversuch mit 4 cm Überstau, noch eine Stunde länger abgelesen. In einem Langzeitversuch wurde die Zeit des Überstaus bis auf 12 Stunden ausgedehnt.

In der Regel waren die niedrigsten Werte für die kapillarre Saugspannung jedoch bereits nach 5 Minuten Überstau erreicht. Der dabei abgelesene Wert von 1 mm Quecksilbersäule, der umgerechnet einen pF-Wert von 0,12 bedeutet, ist so gering, daß man mit guter Näherung die Ergebnisse von *Baumgart* (1969, S.46) bestätigt findet.

Baumgart hat in einem Laborversuch die Strömungsverhältnisse unter einer versickernden Wasserschicht mit Hilfe von Piezometern zur Messung der Druckverhältnisse und Farbe zur Markierung der Stromlinien untersucht. Dabei stellte sich heraus, daß die Nullinie des Drucks außerhalb des in dieser Arbeit geforderten imaginären Versuchszylinders verläuft. Diese Nullinie zeigt aber gerade, daß die Grenze zwischen negativer kapillarer Saugspannung und positivem - durch die Schwere erzeugten - Druck der Wassersäule innerhalb des Zylinders verläuft.

Damit stand fest, daß die Voraussetzung zur Ermittlung des Durchlässigkeitswertes durch einen solchen Versickerungsversuch in optimaler Annäherung an den natürlichen Vorgang erreicht waren.

4 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse aus der Versickerungsmessung und den Labormessungen

Der Vergleich zwischen den im Labor gemessenen Durchlässigkeitswerten und dem Wert, der aus dem Versickerungsversuch ermittelt wurde, zeigt, - wie nicht anders zu erwarten - daß der Wert aus der Versickerung um etwas mehr als eine halbe Potenz niedriger liegt. Grund für die Differenz dürfte, wie oben angegeben, im aufgelockerten Gefüge der Zylinderproben liegen.

Mit den Werten aus dem Versickerungsversuch ist der Durchlässigkeitsbeiwert in senkrechter Richtung (bei einem Restluftgehalt) im tatsächlich ungestörten Sedimentverband gegeben.

Zur genaueren Ermittlung des Restluftgehalts nach mehrstündigem Überstau wurde eine Probe des untersuchten Sediments 12 Stunden mit einer Höhe von 4 cm überstaut und anschließend gewogen. Danach ergab sich ein Sättigungsgrad von 96 %, d.h. der Restluftgehalt betrug nur 4 %. Somit kann man auch für den Geländeversuch mit einem Sättigungsgrad von ca. 95 % im filtrierten Prüfvolumen rechnen. Ob sich dieser Sättigungsgrad von der im Labor zu erreichenden noch wesentlich unterscheidet, ist fraglich. Daraus resultiert, daß der Fehler durch ungesättigten Porenanteil bei beiden Methoden in gleicher Weise auftreten dürfte.

Obwohl die Methode gewissen Einschränkungen unterliegt (senkrechter Durchlässigkeitsbeiwert, Restluftgehalt, Anwendung nur in homogenen Sedimenten von mindestens einigen dm Mächtigkeit und aufwendiger Transport von Wasser zur Versickerungsstelle) und auch zugegeben werden muß, daß sie noch nicht den exakten Durchlässigkeitsbeiwert liefert, wird sie in vielen Fällen einen besseren Wert ergeben, als die vorher untersuchten Labormethoden. Sie hat gegenüber den Labormethoden den großen Vorteil, daß sie von allen Fehlern der Probenentnahme frei ist. Zudem ist das betrachtete Prüfvolumen wesentlich größer als im Laborversuch, so daß der Wert dem natürlich vorhandenen Durchlässigkeitswert eher entsprechen dürfte.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit sollte versucht werden, für die Bestimmung von Durchlässigkeitswerten an Lockergesteinen Methoden zu untersuchen, die ohne aufwendige Bohrungen durchzuführen sind.

Die Durchlässigkeit ist in komplizierter Weise abhängig vom Porenanteil. Für einige rechnerische Verfahren zur Durchlässigkeitsbestimmung ist die Kenntnis des Porenanteils Voraussetzung. Deshalb wurden verschiedene Methoden der Porenanteilbestimmung vergleichsweise verwendet. Als bestes Verfahren erwies sich dabei die Pyknometermethode.

Eine kritische Betrachtung der Meßmethoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit setzt die Kenntnisse der Vorgänge voraus, die das Strömen von Flüssigkeiten oder Gasen im porösen Raum bestimmen. Deshalb wurde auf die wichtigsten Gesetze, die die Strömung bestimmen eingegangen, wobei das allgemeine Widerstandsgesetz für verschiedene strömende Medien mit dem Ergebnis in Darcy-Werten (cm^2) gegenübergestellt wird der spezielleren Fassung des Widerstandsgesetzes, die sich nur auf Wasser bezieht und als Ergebnis den Durchlässigkeitsbeiwert in cm/s erhält.

Zum Vergleich von vier Labormethoden (Luftpermeameter, Wasserpermeameter, Berechnung nach *Beyer* und Berechnung nach *Kozeny u. Carman*) wurden unterschiedliche Sedimentproben aus der ostniederbayrischen Molasse herangezogen.

Die nach den verschiedenen Methoden ermittelten Meßergebnisse weichen so stark voneinander ab, daß ihr Aussagewert in Zweifelgezogen werden muß. Berücksichtigt man neben den methodischen Fehlern noch die beträchtlichen Fehler durch die Probenentnahme und die Beschränkung der Stichproben auf ein Aufschlußdetail, so kommt man zu dem Schluß, daß Durchlässigkeitsmessungen im Labor nur grobe Näherungswerte, keinesfalls aber annähernd exakte Daten für das natürliche Sediment ergeben.

Es wurde eine neue Methode entwickelt, um im Gelände aus der Versickerung von Wasser in einer homogenen Sedimentschicht einen Durchlässigkeitswert zu erhalten. Dazu ist das Verständnis des Infiltrationsvorganges Voraussetzung. Die Versuchsbedingungen wurden mit der Neutronensonde zur Kontrolle des Wassergehalts und mit pF-Messungen zur Kontrolle der kapillaren Saugspannung überprüft. Auf diese Weise konnte eine Reihe von Fehlern der bisher üblichen Labormethoden ausgeschaltet werden, so daß die Methode - wo sie anwendbar ist - gegenüber den oben genannten Verfahren eine Verbesserung darstellt.

Tabelle 1: Ergebnisse sämtlicher Porenanteilmessungen

Zyl.	Probeorientierung	Luftpyknometer	Verdrängung	Dichte (2,65) + Gewicht
		n %	n %	n %
1	∥	44,9		
2	∥	53,9		
3	∥		54,5	52,2
4	∥	49,2	51,3	49,3
5	∥	50,2	50,2	50,8
6	⊥	47,6		
7	⊥	43,8	47,8	45,2
8	⊥	49,2	51,8	49,8
9	⊥		48,7	48,4
10	⊥	43,4	48,7	42,6
11	⊥	44,8		
12	⊥	43,0	46,1	45,2
13	∥	49,7	54,8	51,3
14	⊥	46,6	51,7	49,3
15	∥	47,1	50,3	47,8
16	∥	48,2		
17	∥	48,1	50,8	48,8
18	⊥	48,8		
19	∥	47,7		
20	∥	44,9	49,5	44,8
21	⊥	46,3		
22	⊥	42,7	46,8	43,8
23	∥	51,6	60,5	53,7
24	⊥	46,2	43,1	46,3
25	∥	44,8	47,4	45,0
26	∥	48,2		
27	⊥	38,1		
28	⊥	39,4		
29	∥	42,7	49,0	47,2
30	⊥	zerbrochen		
31	⊥	40,4	44,6	48,8
32	∥	38,7		
33	⊥	außerhalb des Nomogrammes		
34	∥	53,1	50,9	51,0
35	⊥	47,5		
36	∥	46,6		
37	∥	42,1		
38	⊥	44,9		
39	⊥		52,1	51,9

noch Tabelle 1:

Zyl.	Probeorientierung	Luftpyknometer n %	Verdrängung n %	Dichte (2,65) + Gewicht n %
3 a	⊥	37,6		
7 a	∥	36,1		
10 a	∥	43,6		
13 a	⊥	40,9		
14 a	∥	37,6		
15 a	⊥	41,9		
22 a	⊥	39,6		
31 a	∥	43,7		
34 a	⊥	33,7		
39 a	∥	35,9		

waagerechte Zylinder Achse = ∥
senkrechte Zylinder Achse = ⊥

Tabelle 2: Porenanteilmessungen der waagerecht und senkrecht entnommenen Proben, geordnet nach steigendem Porenraum der waagerecht entnommenen Probe (gemessen mit dem Luftpyknometer)

waager. entn. Zyl.	n (%)	n (%)	senkr. entn. Zyl.	Differenz
39 a	35,9	33,7	34 a	2,2 %
7 a	36,1	37,6	3 a	1,5 %
14 a	37,6	39,6	22 a	2,0 %
26	38,2	39,4	28	1,2 %
32	38,7	38,1	27	0,6 %
37	42,1	40,4	31	1,7 %
10 a	43,6	40,9	13a	1,7 %
31 a	43,7	41,9	15 a	1,8 %
25	44,8	44,9	38	0,1 %
20	44,9	43,4	10	1,5 %
1	44,9	46,3	21	1,4 %
36	46,6	47,5	35	0,9 %
15	47,1	46,2	24	0,9 %
19	47,7	48,8	18	1,1 %
17	48,1	42,7	22	5,4 %
16	48,2	44,8	11	3,4 %
4	49,2	43,0	12	6,2 %
13	49,7	46,6	14	3,1 %
23	51,6	49,2	8	2,4 %
2	53,9	47,6	6	6,3 %

Die arithmetrisch ermittelte Abweichung beträgt 2,27 %

Tabelle 3: Durchlässigkeitsunterschiede zwischen waagerecht und senkrecht entnommenen Proben (gemessen mit dem Luftpermeameter)

waager. entn. Zyl.	k - Wert (m/s)	k - Wert (m/s)	senkr. entn. Zyl.
1	$1{,}6 \cdot 10^{-6}$	$6{,}0 \cdot 10^{-7}$	21
2	$5{,}2 \cdot 10^{-5}$	$1{,}3 \cdot 10^{-5}$	6
3	$7{,}4 \cdot 10^{-5}$	$1{,}3 \cdot 10^{-5}$	7
4	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	12
5	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	9
13	$9{,}4 \cdot 10^{-6}$	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	14
15	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	$9{,}4 \cdot 10^{-5}$	24
16	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$	$1{,}7 \cdot 10^{-6}$	11
17	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	$3{,}9 \cdot 10^{-5}$	22
19	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$	Zerbrochen	18
20	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	10
23	$4{,}0 \cdot 10^{-5}$	$2{,}1 \cdot 10^{-5}$	8
25	$4{,}5 \cdot 10^{-5}$	$2{,}7 \cdot 10^{-5}$	38
29	$7{,}2 \cdot 10^{-5}$	$9{,}1 \cdot 10^{-5}$	33
34	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$	39
36	$4{,}0 \cdot 10^{-6}$	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$	35
37	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$2{,}8 \cdot 10^{-5}$	31
7 a	$4{,}9 \cdot 10^{-5}$	$5{,}9 \cdot 10^{-5}$	3 a
10 a	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$	13 a
14 a	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	$5{,}1 \cdot 10^{-6}$	22 a

Tabelle 4: Ergebnisse sämtlicher Durchlässigkeitsmessungen

Zyl.	Probe-orientierung	Luft-permeameter (m/s)	Wasser-permeameter (m/s)	Wasserdurchl. nach *Hazen/Beyer* (m/s)	Wasserdurchl. nach *Kozeny/Carmen* (m/s)
1	∥	$1{,}6 \cdot 10^{-6}$			
2	∥	$5{,}2 \cdot 10^{-5}$			
3	∥	$7{,}4 \cdot 10^{-5}$	$5{,}72 \cdot 10^{-5}$	$4{,}7 \cdot 10^{-5}$	$4{,}7 \cdot 10^{-4}$
4	∥	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$3{,}9 \cdot 10^{-5}$	$8{,}9 \cdot 10^{-5}$	$7{,}3 \cdot 10^{-4}$
5	∥	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$	$2{,}1 \cdot 10^{-4}$	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$
6	⊥	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$			
7	⊥	$1{,}3 \cdot 10^{-5}$	$1{,}1 \cdot 10^{-5}$	$5{,}3 \cdot 10^{-5}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$
8	⊥	$2{,}1 \cdot 10^{-5}$	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$		
9	⊥	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	$6{,}7 \cdot 10^{-5}$	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$	$8{,}2 \cdot 10^{-4}$
10	⊥	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$2{,}6 \cdot 10^{-4}$	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$
11	⊥	$1{,}1 \cdot 10^{-6}$			
12	⊥	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	$5{,}6 \cdot 10^{-5}$	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$	$3{,}0 \cdot 10^{-4}$
13	∥	$9{,}4 \cdot 10^{-6}$	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$		
14	⊥	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	$2{,}4 \cdot 10^{-4}$		
15	∥	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$7{,}0 \cdot 10^{-4}$
16	∥	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$			
17	∥	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	$9{,}2 \cdot 10^{-5}$	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$6{,}1 \cdot 10^{-4}$
18	⊥	zerbrochen			
19	∥	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$			
20	∥	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$
21	⊥	$6{,}0 \cdot 10^{-7}$			
22	⊥	$3{,}9 \cdot 10^{-5}$	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$	$8{,}9 \cdot 10^{-5}$	$4{,}2 \cdot 10^{-4}$
23	∥	$4{,}0 \cdot 10^{-5}$			
24	⊥	$9{,}4 \cdot 10^{-5}$	$8{,}1 \cdot 10^{-5}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$3{,}5 \cdot 10^{-2}$
25	∥	$4{,}48 \cdot 10^{-5}$	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$		
26	∥	$7{,}5 \cdot 10^{-6}$			
27	⊥	zerbrochen			
28	⊥	$6{,}0 \cdot 10^{-6}$			
29	∥	$7{,}2 \cdot 10^{-5}$	$3{,}7 \cdot 10^{-5}$		$8{,}1 \cdot 10^{-5}$
30	⊥	zerbrochen			
31	⊥	$2{,}6 \cdot 10^{-5}$	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$		
32	∥	dicht			
33	⊥	$9{,}1 \cdot 10^{-5}$			
34	∥	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$7{,}9 \cdot 10^{-5}$	$6{,}1 \cdot 10^{-5}$	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$
35	⊥	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$			
36	∥	$4{,}0 \cdot 10^{-6}$			
37	∥	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$			
38	⊥	$2{,}7 \cdot 10^{-5}$			
39	⊥	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$	$9{,}9 \cdot 10^{-5}$	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$
3 a	⊥	$5{,}9 \cdot 10^{-5}$			
7 a	∥	$4{,}9 \cdot 10^{-5}$			
10 a	∥	$1{,}15 \cdot 10^{-5}$			
13 a	⊥	$1{,}73 \cdot 10^{-5}$			
14 a	∥	$1{,}03 \cdot 10^{-5}$			
15 a	⊥	$2{,}54 \cdot 10^{-5}$?			
22 a	⊥	$5{,}06 \cdot 10^{-6}$			
31 a	∥	zerbrochen			
34 a	⊥	zerbrochen			
39 a	∥	zerbrochen			

waagerechte Zylinder Achse = ∥
senkrechte Zylinder Achse = ⊥

Tabelle 5: Durchlässigkeits- und Porenanteilwerte der Zylinderproben aus dem Versickerungsprofil Berlin - Wannsee

Probe	Teufe (cm)	Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)	Porenanteil n (%)
W 1	15	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$	34,1
W 2	29	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	36,0
W 3	44	$2{,}6 \cdot 10^{-4}$	37,4
W 4	56	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	39,0
W 5	69	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	37,1
W 6	82	$1{,}7 \cdot 10^{-4}$	39,4
W 7	96	$5{,}0 \cdot 10^{-5}$	40,2
W 8	110	$2{,}0 \cdot 10^{-5}$	37,1
W 9	125		36,3
W 10	140	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$	33,8
W 11	152		34,6
W 12	166	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$	35,5
W 13	180		33,8
W 14	195	$7{,}9 \cdot 10^{-5}$	35,5

Die Proben W 1 - W 6 entsprechen der oberen homogenen Schicht
Die Proben W 7 - W 14 entsprechen der unteren homogenen Schicht

Literatur

Assmann, P.: Der geologische Aufbau der Gegend von Berlin - Senator für Bau- und Wohnungswesen, Berlin 1957

Aurand, K., D. Beckmann und K. Kasiske: Kontinuierliche Bodenfeuchtemessung mit Neutronensonde, Magnetbandspeicherung und elektronischer Auswertung - Dechema Monographien **61** 1967)

Baumgart, H.Ch.: Modellversuche zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit k_f des Bodens auf dem Wege der Infiltration von Wasser mit dem Doppelrohrgerät - DGM **13** (1969) H.2

Beyer, W.: Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve - Wasserwirtschaft - Wassertechnik **14** (1964) H. 6

Blecher, D.J., T.R. Cuykendall und H.S. Sack: The measurement of Soil moisture and density neutron and gamma ray scattering - Technical Development Report **127** Indianapolis (Indiana) 1950

Buchmann, J.: Untersuchung der Dynamik des Wasserhaushaltes verschiedener Bodentypen, insbesondere mit Hilfe der Neutronensonde - Diss. Uni. Bonn 1969

Carman, P.C.: Flow of Gases through porous Media - London 1956

Chardabellas, P.E.: Durchflußwiderstände und ihre Abhängigkeit von Flüssigkeits- und Bodenkennziffern - Mitt. Preuß. Versuchsanst. Wasser-, Erd- und Schiffbau **40** Berlin 1940

Darcy, H.: Les Fontaines publique de la ville de Dijon - Paris 1856

DIN 18121: Baugrunduntersuchungen von Bodenproben, Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung (Entwurf 6) - Beuth Verlag Berlin 1965

DIN 18123: Baugrunduntersuchungen von Bodenproben, Korngrößenverteilung (Entwurf 3) Beuth Verlag Berlin 1964

DIN 4015: Grundbau, Fachausdrücke, Zeichen (Entwurf) - Beuth Verlag Berlin 1969

DIN 4021: Grundsätze für die Entnahme von Bodenproben - Beuth Verlag Berlin 1955

Engelhardt, W.v.: Der Porenraum der Sedimente - Springer Verlag usw. Berlin 1960

Engelhardt, W.v. und H. Pitter: Über die Zusammenhänge zwischen Porosität, Permeabilität und Korngröße bei Sanden und Sandsteinen - Heidelberger Beitr. Min. Petr. **2** (1951)

Gardner, W. und D. Kirkham: Determination of moisture by neutronscattering - Soil Sci. **73** (1952)

Geiseler, W.D.: Über die Strömungsvorgänge bei Vertikalbrunnen mit einfacher Kiesschüttung unter besonderer Berücksichtigung der Leistungssteigerung durch Entsanden - Diss. T.U. Berlin 1967

Grimm, W.D.: Stratigraphische und sedimentpetrographische Untersuchungen in der oberen Süßwassermolasse zwischen Rott und Inn (Niederbayern) - Beih. Geol. Jb. **26** (1957)

Hazen, A.: Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration - 24 Ann. Report, Mass. State Board of Health Pub. Document **34** (1892)

Hillel, D.: Soil and Water - Academic Press New York und London 1971

Köhler, H.P.: Ein kombinierendes Verfahren zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Sand- und Kiesgemischen für Wasser aus Siebproben - Bergbautechnik **15** (1965) H.7

Kopp, E.: Die Permeabilität durchlässiger Böden, die Gliederung des Makroporenraumes und die Beziehungen zwischen Permeabilität und Bodentypen - Z. Kulturtechnik u. Flurbereinigung **6** (1965)

Kühn, H.: Möglichkeiten zur Untersuchung der Mikrohydraulik des Grundwassers - Beih, Ber. Naturh. Ges. **5** Keller-Festschrift Hannover 1968

Mayer-Gürr, A. in Bentz, A. und H.J. Martini: Lehrbuch der Angewandten Geologie - Band II, 1. Teil, Ferd. Enke Verlag, Stuttgart 1968

Meier, G.K.: Das Grundwasser in den Lockersedimenten Ostniederbayerns - Diss. Uni. München 1969

Müller, G.: Methoden der Sedimentuntersuchung - Sediment - Petrologie **I** E. Schweizerbarth'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart 1964

Naujoks, L.: Ein Permeameter mit Druckkonstanthalter zur Bestimmung der Durchlässigkeit bindiger Böden - Tonindustriezeitung **83** (1959) H.16

Osthoff, H.: Untersuchungen über den Einfluß unterschiedlicher Beregnung und Düngung auf die Bestandsänderung und die Ertragsbildung einer Wiese ohne Grundwassereinfluß - Diss. T.U. Berlin 1969

Phillip, J.R.: The Theory of Infiltration - Soil Sci. **83**, (1957) a + b **84** (1957) c

Richards, L.A.: Methods of Measuring Soil Moisture Tension - Soil Sci, **68** (1949)

Rieser, A.: Bodenkundliche, wasserhaushaltliche und wirtschaftliche Probleme bei der Melioration, vor allem pseudovergleyter Böden in der westlichen Eifel - Diss. Uni. Bonn 1969

Schießl, K.H.: Die Verteilung der Schwermineralien in der Süßbrackwassermolasse Niederbayerns - Diss. Uni. München 1962

Schultze, E. und H. Muhs: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten - II. Auflage Springer Verlag Berlin usw. 1967

Spoerel, M.: Ein einfaches Verfahren zur Bestimmung von Wassergehalten und spezifischem Gewicht von Bodenproben im Laboratorium und auf der Baustelle - Straße und Autobahn **8** (1957)

Swartzendruber, D. in de Wiest, R.J.M.: Flow through porous Media - Academic Press New York und London 1969

Terzaghi, K. und R. Peck: Die Bodenmechanik in der Baupraxis - Springer Verlag Berlin usw. 1961

Tessendorf, H.: Untersuchungen zum Widerstandsgesetz für die Durchströmung von Kugelschüttungen - Diss. T.U. Berlin 1962

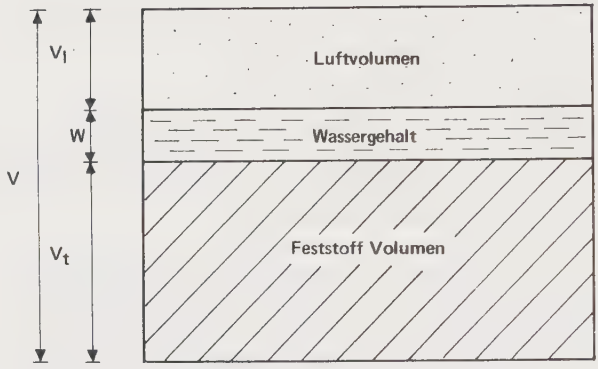
Todd, D.K. in Chow, V.T.: Handbook of applied Hydrology - Mc Graw - Hill Book Co New York 1964

Wolkewitz, H.: Die Weiterentwicklung des Verfahrens der pF-Untersuchung zur Feststellung der Bindungsintensität des Wassers im Boden - Der Kulturtechniker **47** (1959)

Wolkewitz, H.: Die physikalischen Eigenschaften von Böden, ihre methodische Erfassung und ihre Veränderung durch verschiedene Faktoren, dargestellt an Modellsubstanzen - Habilitationsschrift T.U. Berlin 1964

Wittmann, D.: Gliederung und Verbreitung der Süßbrackwassermolasse in Ostniederbayern - Beih. Geol. Jb. **26** Hannover 1957

Abb. 1



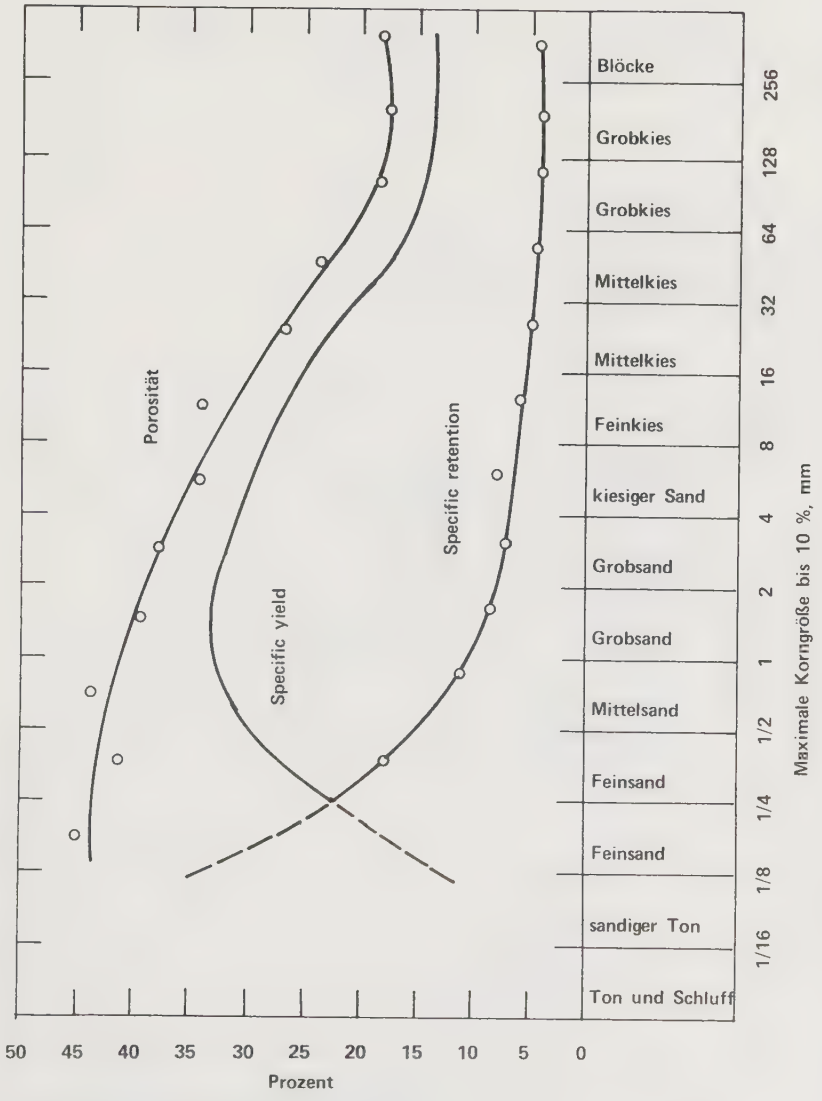
$$n = \frac{V - Vt}{V} \quad 100\ (\%); \quad n = \frac{e}{1 + e}$$

$$e = \frac{V - Vt}{Vt} \quad ; \quad e = \frac{1 - n}{n}$$

DIN 4015	SCHULTZE & MUHS	v. ENGELHARDT	TODD
Porenanteil n	Porenvolumen n	Porosität ϵ	porosity α
Porenzahl e	Porenziffer ε	relativer Porenraum E	–
Feststoffvolumen Vt	Volumen der Festmasse Vt	Volumen der festen Bestandteile Vt	–
Gesamtvolumen V	Gesamtvolumen V	Gesamtvolumen Vg	total volume V
Wassergehalt W	Wasservolumen Vw	–	volume of water W
	Luftvolumen Vl		

BEZIEHUNG ZWISCHEN PORENRAUM UND PORENZIFFER

Abb. 2



ZUSAMMENHANG ZWISCHEN PORENANTEIL UND DURCHLÄSSIGKEIT

(Nach ECKIS zit. von TODD in CHOW 1964, S.13-5 verändert)

Abb. 3

Gliederungsschema der Molasseschichten auf Blatt Triftern (Niederbayern)
(nach Grimm)

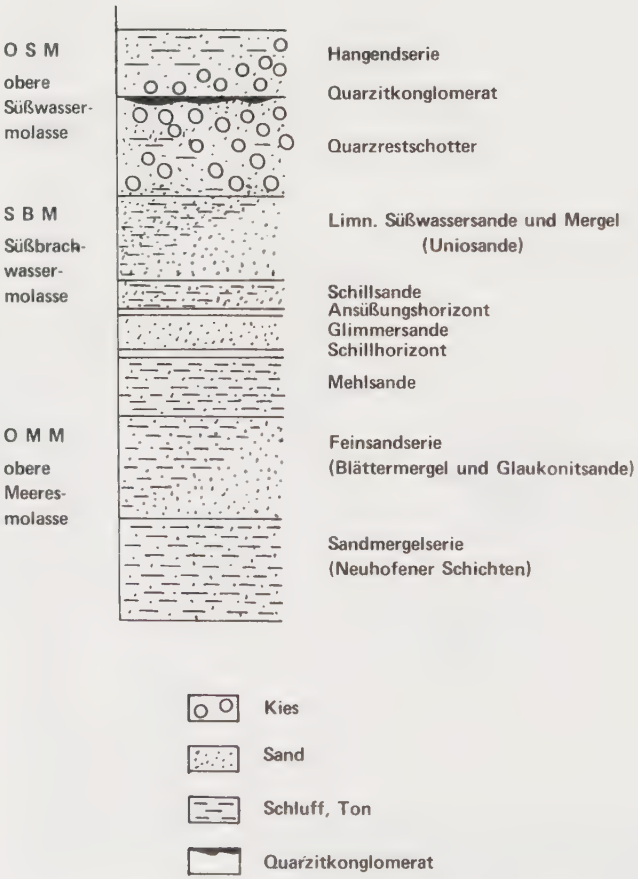
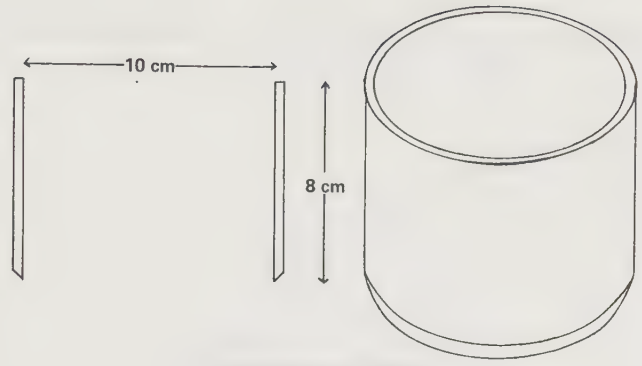
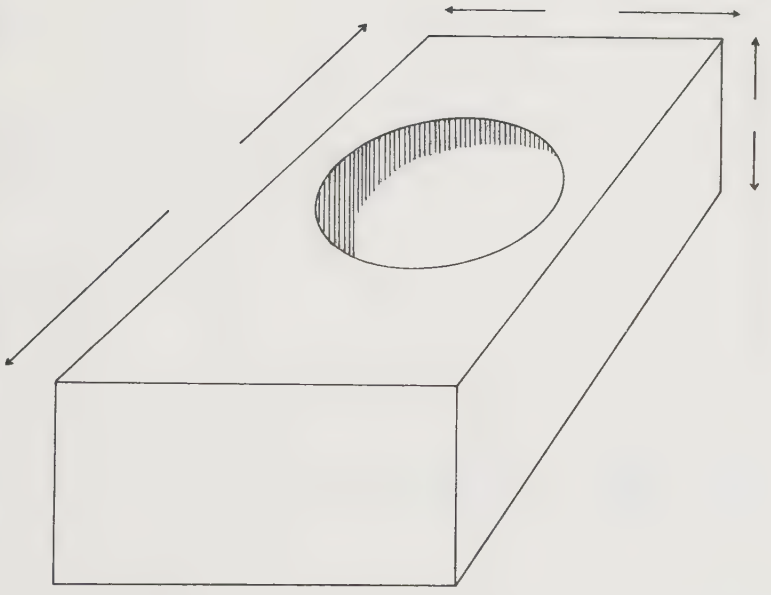


Abb. 4



AUSSTECHZYLINDER



FÜHRUNGSBLOCK FÜR AUSSTECHZYLINDER

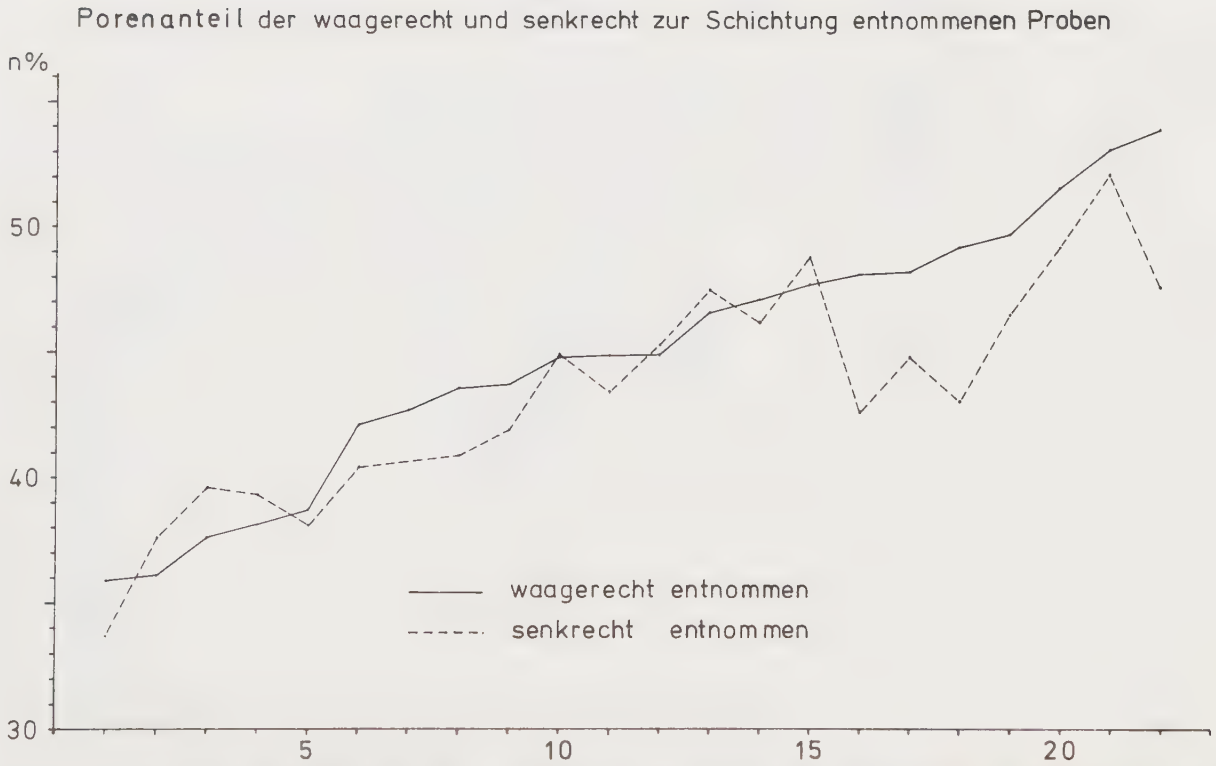
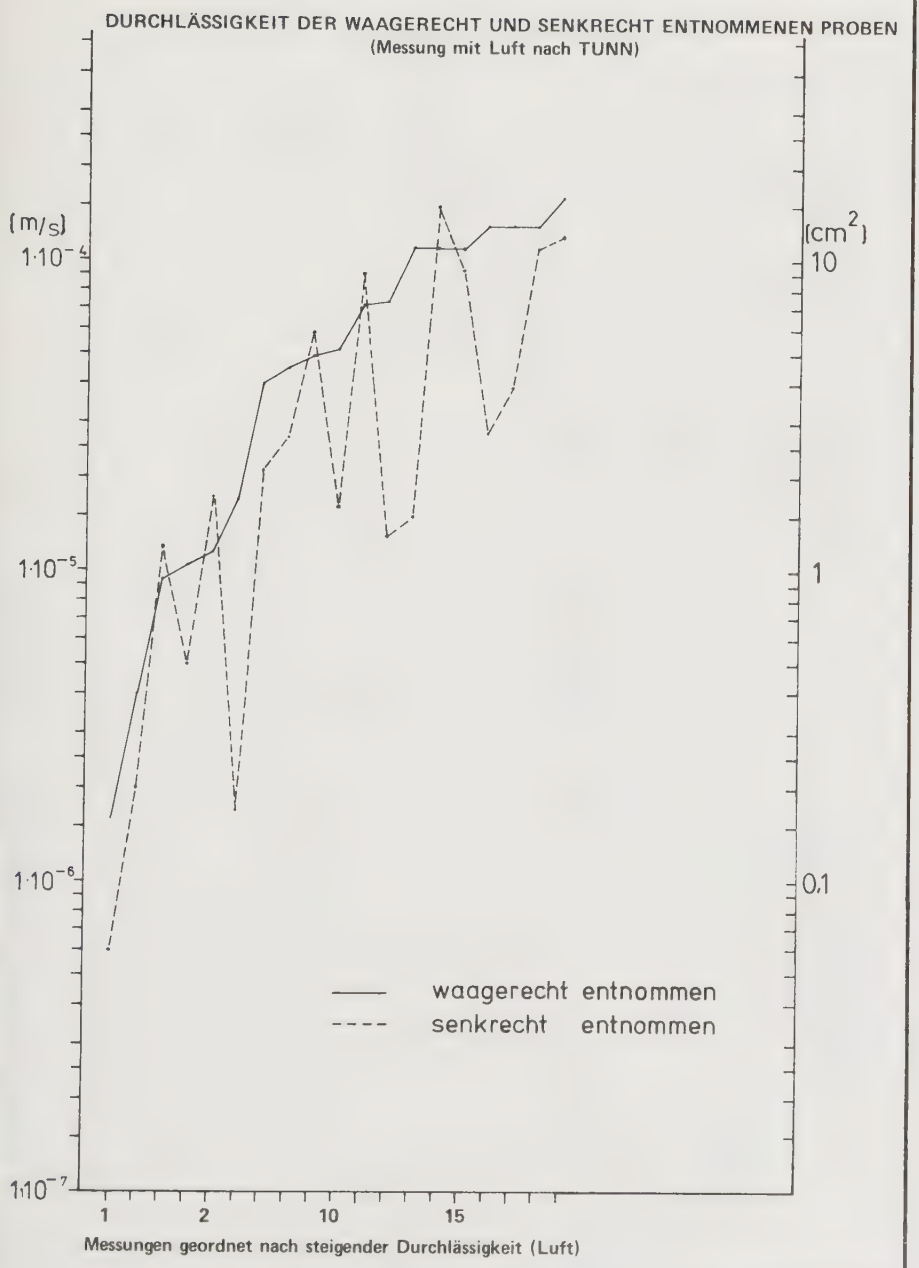
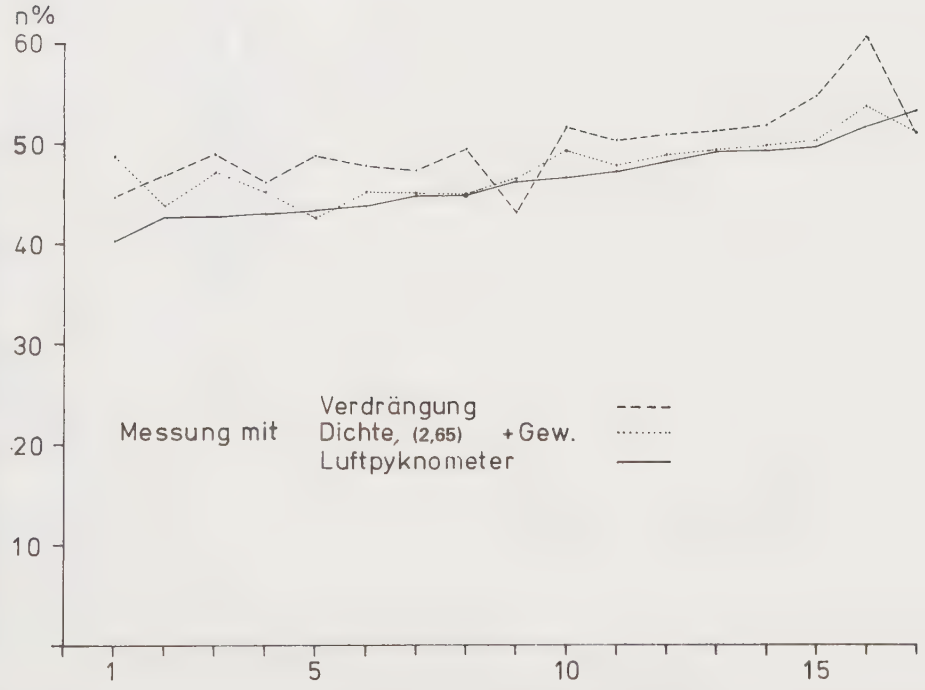

Porenanteil der waagerecht und senkrecht zur Schichtung entnommenen Proben
n%
50
40
30
5
10
15
20
waagerecht entnommen
senkrecht entnommen
Anzahl der Messungen, geordnet nach steigendem Porenraum der waagerecht entnommenen Proben
(Luftpyknometer)

Abb. 5

Abb. 6


DURCHLÄSSIGKEIT DER WAAGERECHT UND SENKRECHT ENTNOMMENEN PROBEN
(Messung mit Luft nach TUNN)
(m/s)
1·10⁻⁴
1·10⁻⁵
1·10⁻⁶
1·10⁻⁷
(cm²)
10
1
0.1
waagerecht entnommen
senkrecht entnommen
1
2
10
15
Messungen geordnet nach steigender Durchlässigkeit (Luft)

VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN PORENANTEILMESSUNGEN



Messungen geordnet nach steigendem Porenraum (Luftpyknometer)

Abb. 7

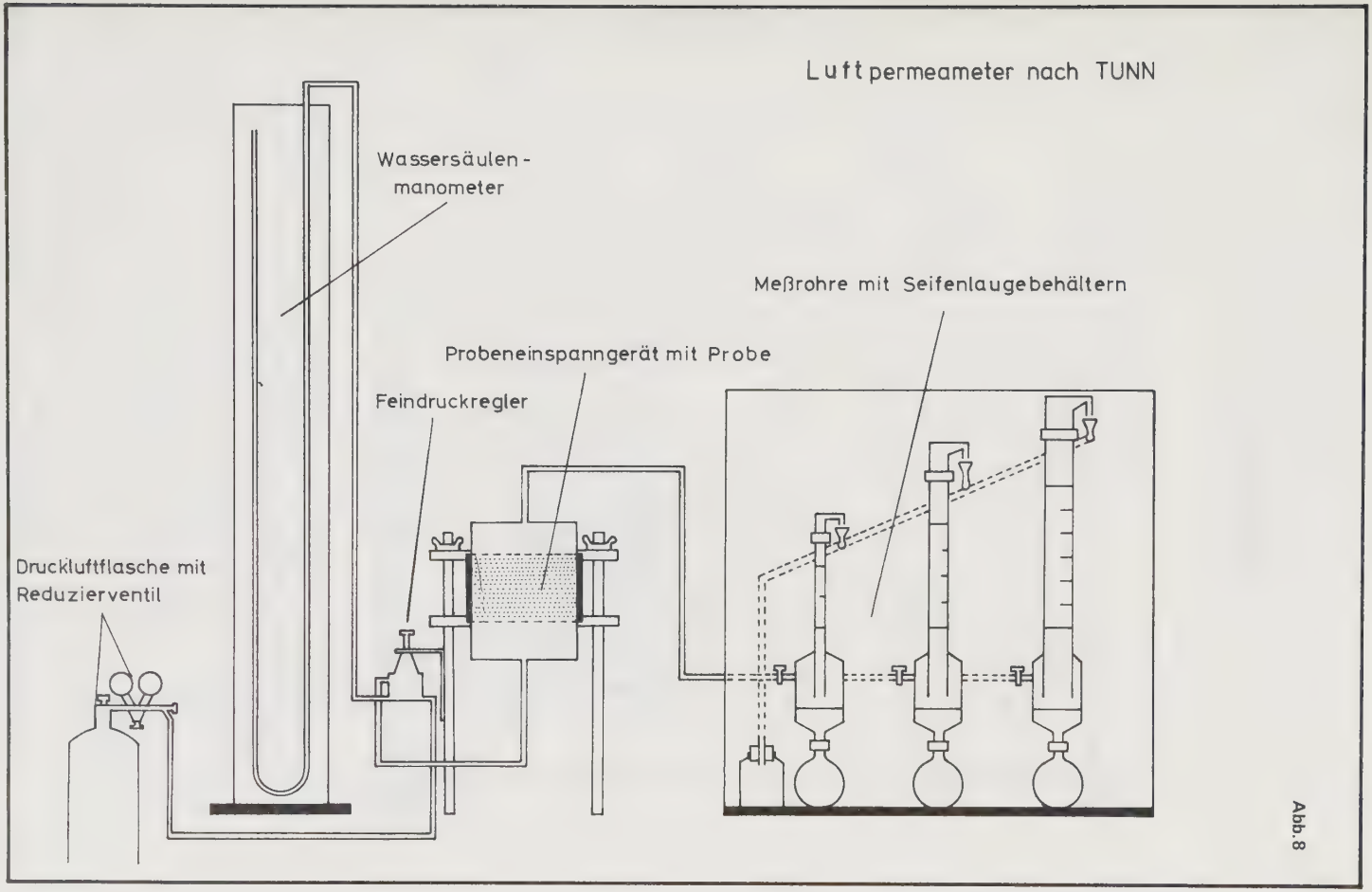
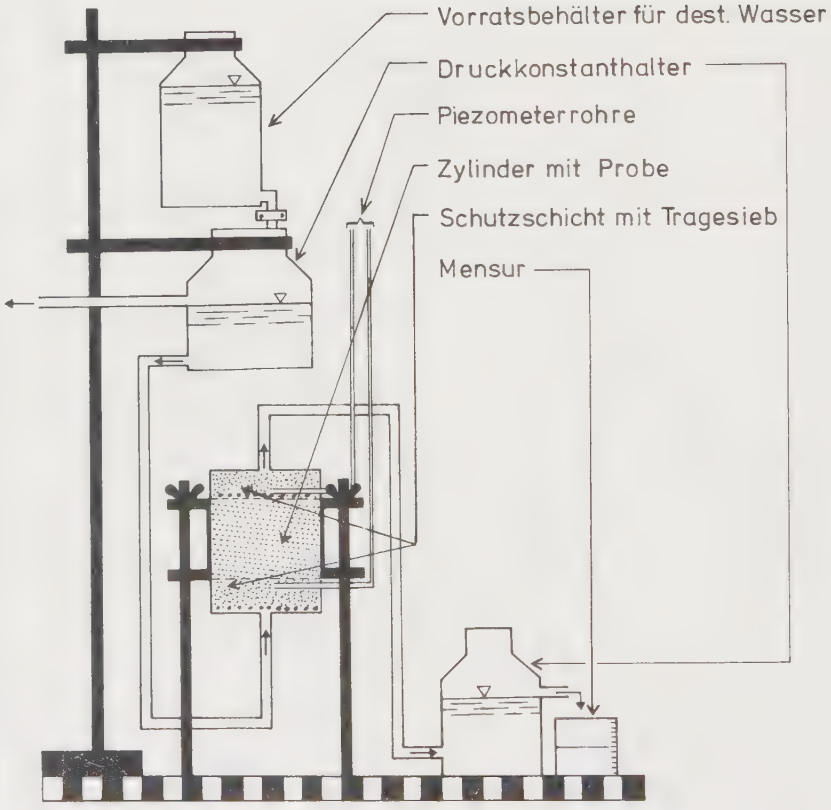
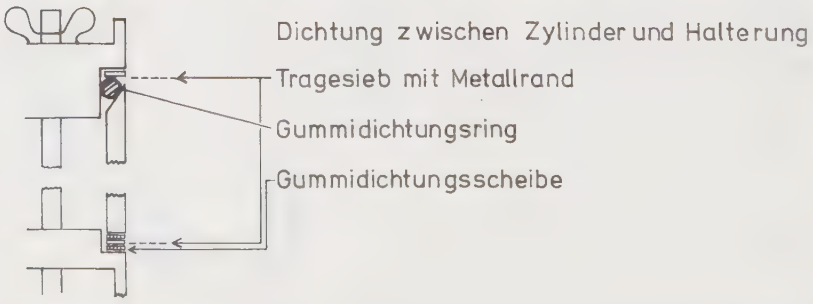

Luftpermeameter nach TUNN
Wassersäulen-
manometer
Meßrohre mit Seifenlaugebehältern
Probeneinspanngerät mit Probe
Feindruckregler
Druckluftflasche mit
Reduzierventil

Abb. 8

Abb.9

WASSERPERMEAMETER





Körnungskurve

Ausgef. durch: _____ Datum: _____

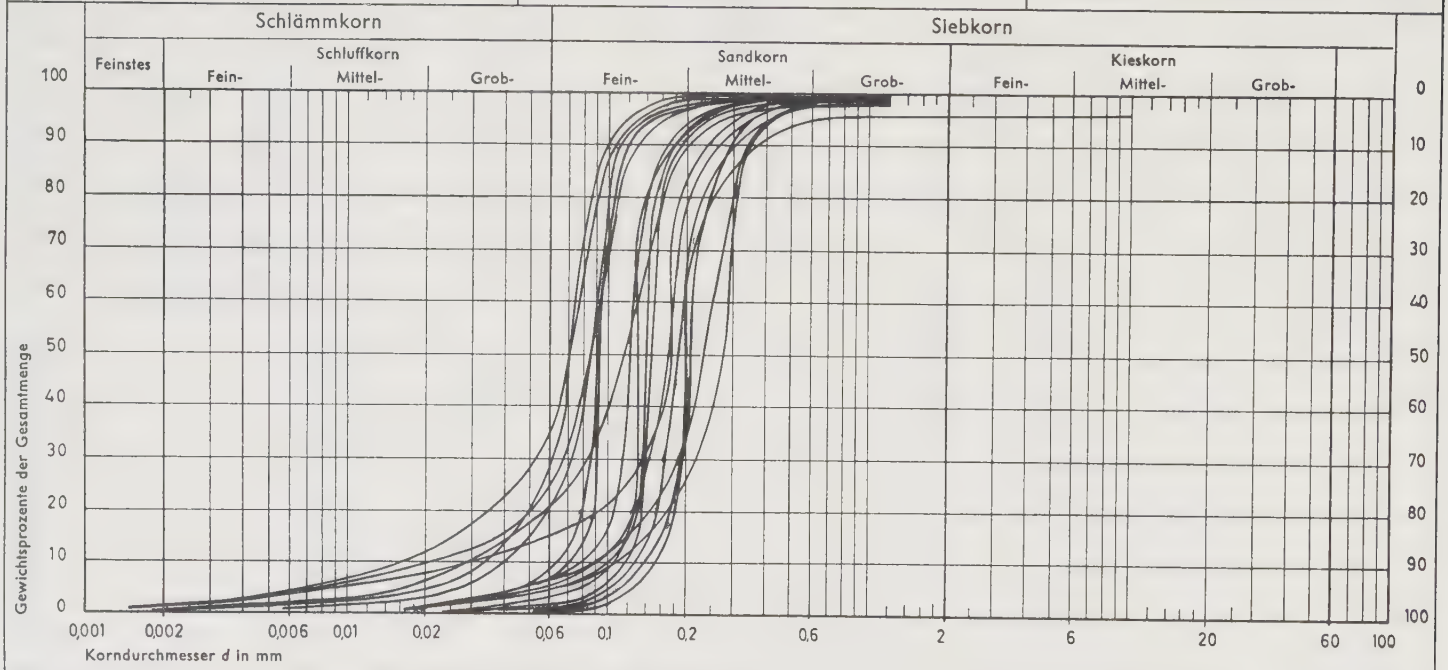
Bauvorhaben: _____

Prüfgs. Nr.: _____

Probe entn. am: _____

Art der Entn.: _____

Arbeitsweise: _____



Kurve Nr.:	Siebsummenlinien der Molasseproben
Bodenart:	
Tiefe:	
$U = d\ 60/d\ 10$:	
Entnahmestelle/Ort:	

Bemerkungen (z. B. Kornform):

zu:

Anlage:

Abb. 10

Abb. 11

VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN DURCHLÄSSIGKEITSMESSUNGEN

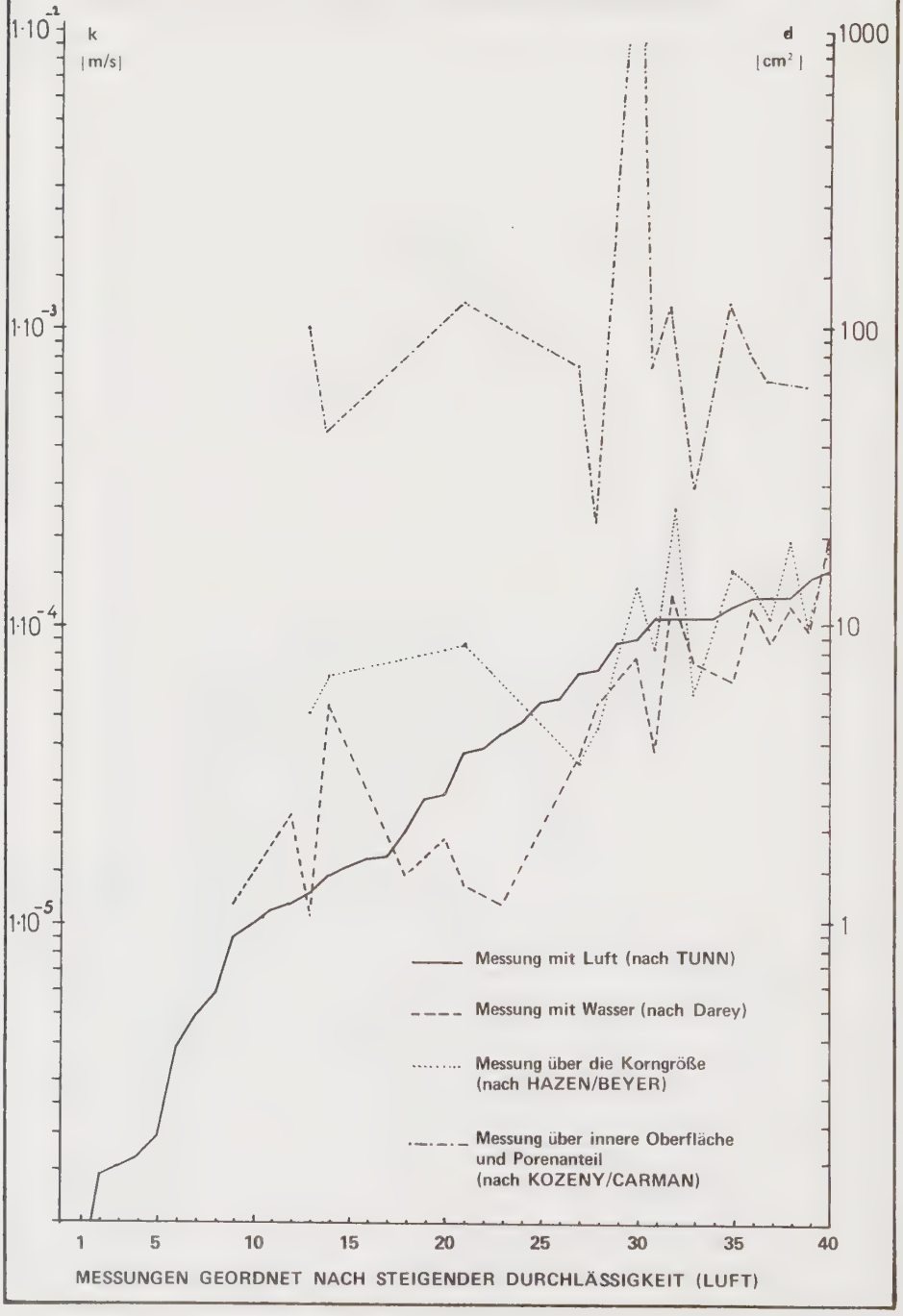
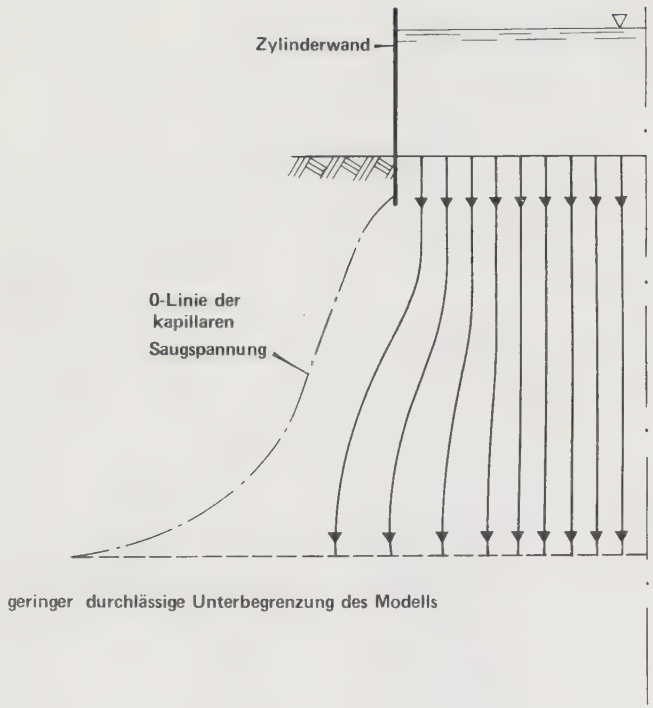
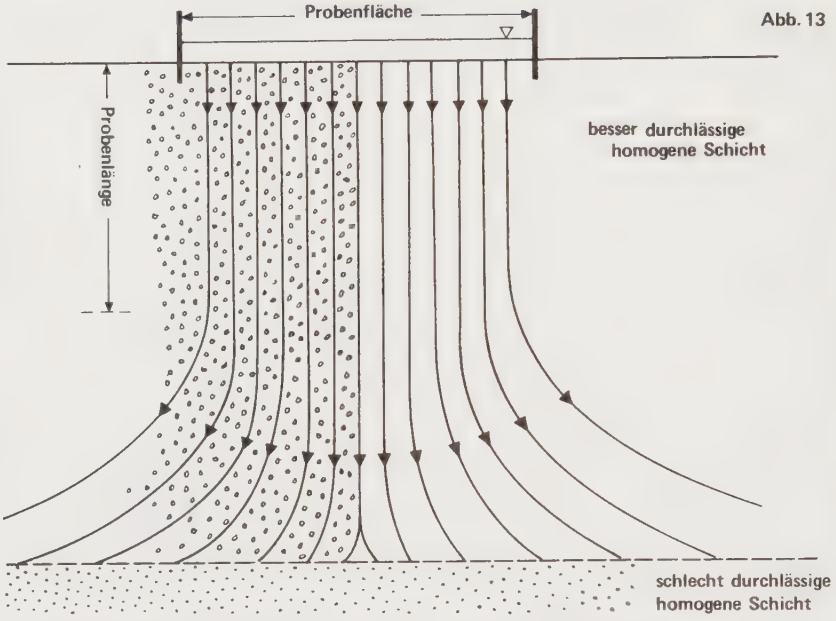


Abb. 12

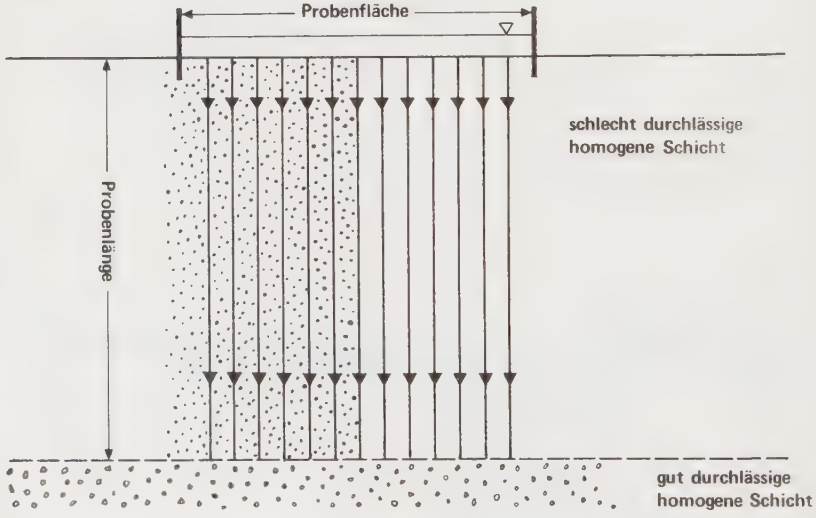


DURCH PIEZOMETER NACHGEWIESENE VERTEILUNG VON STROMLINIEN UNTER EINEM VERSICKERUNGSMODELL(NACH BAUMGART, H.CH. 1969)

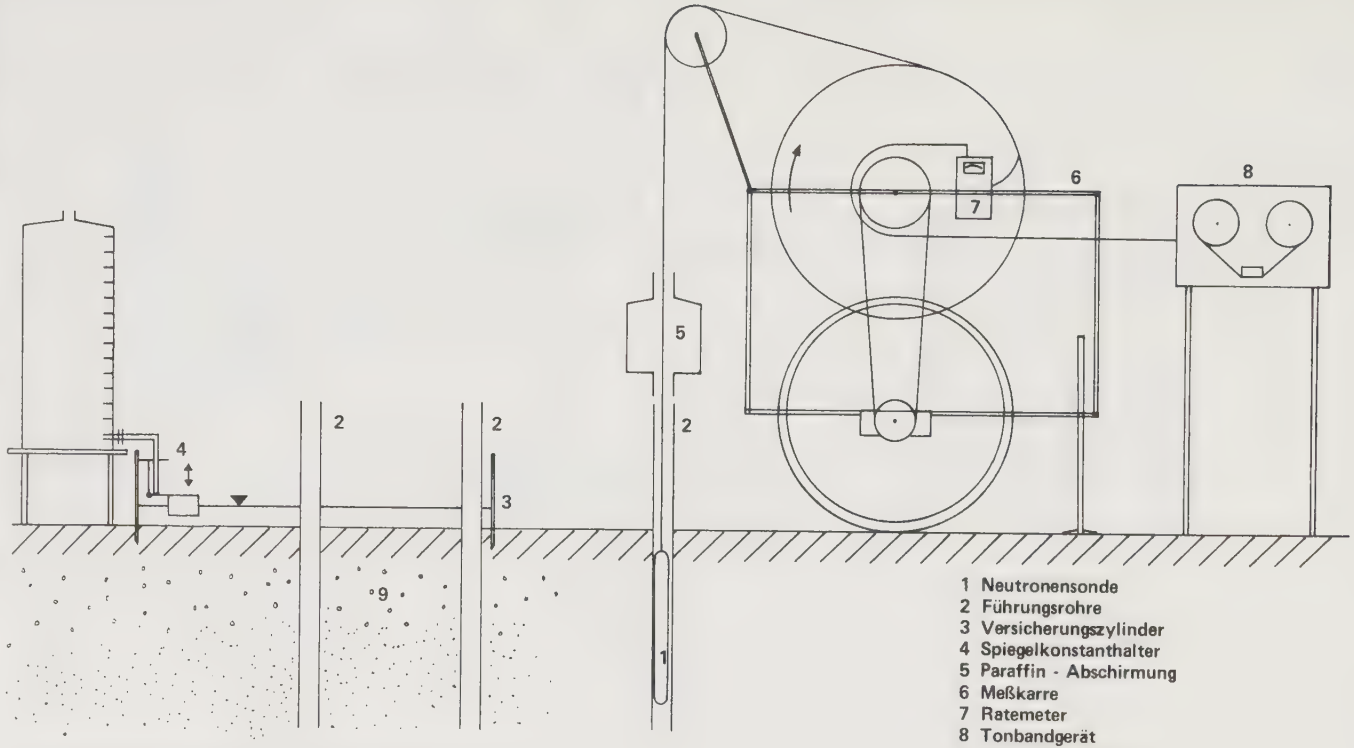
Abb. 13



STRÖMUNGSVERHÄLTNISSE BEI BESSER DURCHLÄSSIGER SCHICHT OBEN, UNTER DER VERSICKERUNGSFLÄCHE



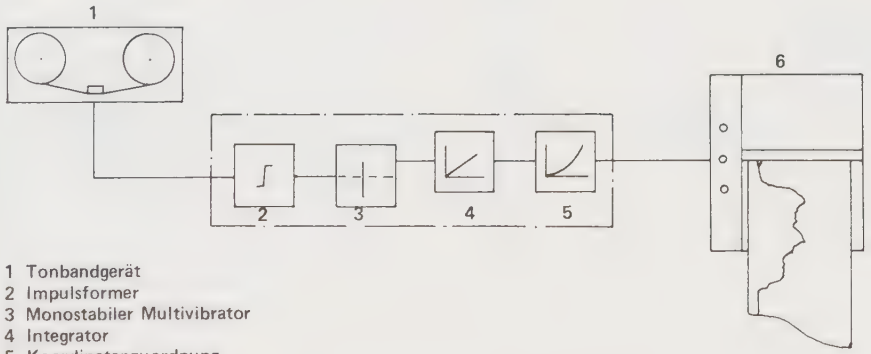
STRÖMUNGSVERHÄLTNISSE BEI SCHLECHTER DURCHLÄSSIGER SCHICHT OBEN, UNTER DER VERSICKERUNGSFLÄCHE



1 Neutronensonde
2 Führungsrohre
3 Versicherungszylinder
4 Spiegelkonstanthalter
5 Paraffin - Abschirmung
6 Meßkarre
7 Ratemeter
8 Tonbandgerät
9 untersuchtes Sediment

VERSUCHSANORDNUNG DER FEUCHTEMESSUNG IM GELÄNDE

Abb. 14

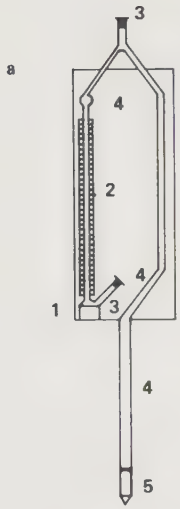


1 Tonbandgerät
2 Impulsformer
3 Monostabiler Multivibrator
4 Integrator
5 Koordinatenzuordnung
6 Registriergerät

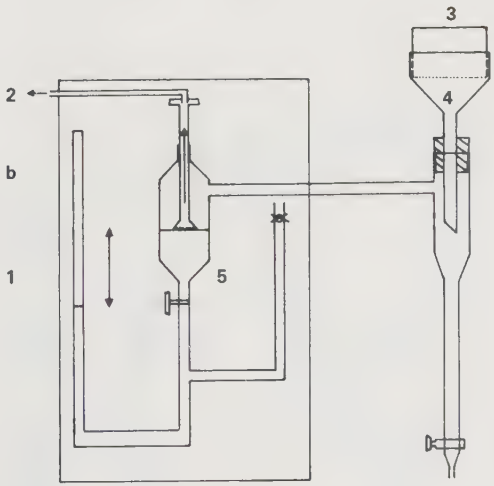
AUSWERTUNG DER FEUCHTEMESSUNG

Abb. 15

Abb. 16



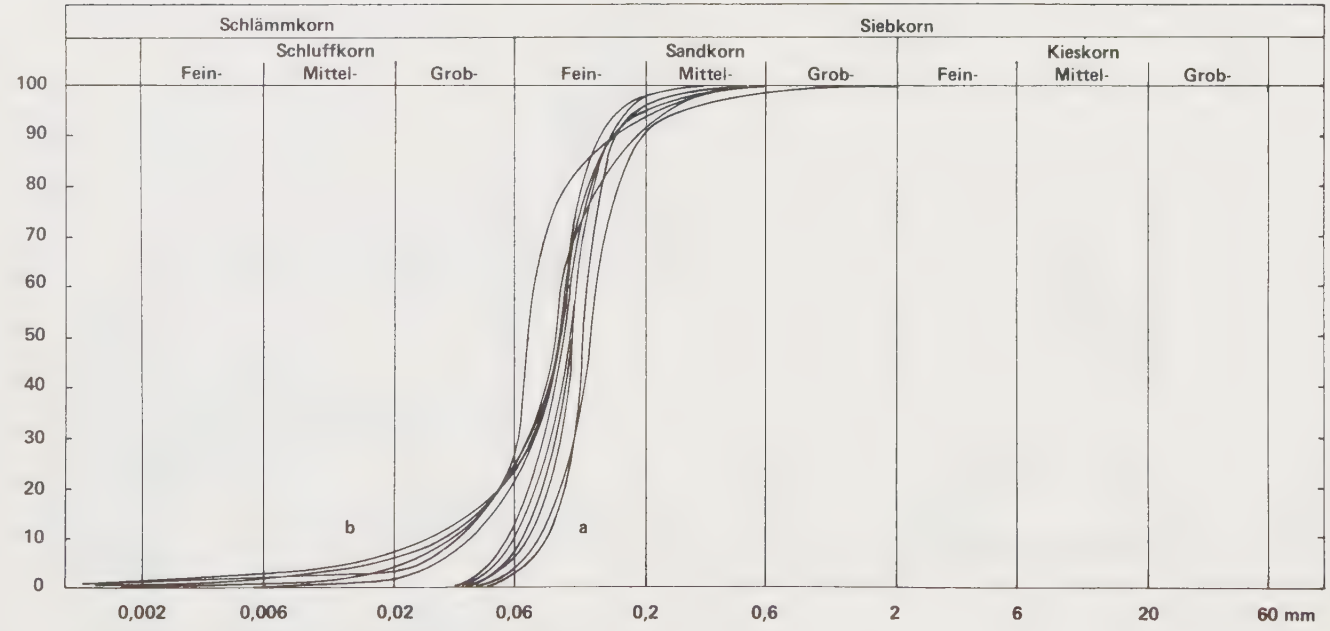
1 Quecksilberbehälter
2 Skala
3 Dichtung
4 Schlauch + Rohrsystem
5 poröse Tonzelle



1 Unterdruckkonstanthalter
2 zur Wasserstrahlpumpe
3 Probenbehälter
4 Glasfilternutsche
5 Meßbürette

pF – Untersuchungsgeräte
a Tensiometer — benetzender Fall
b Absaugapparatur — auslaufender Fall

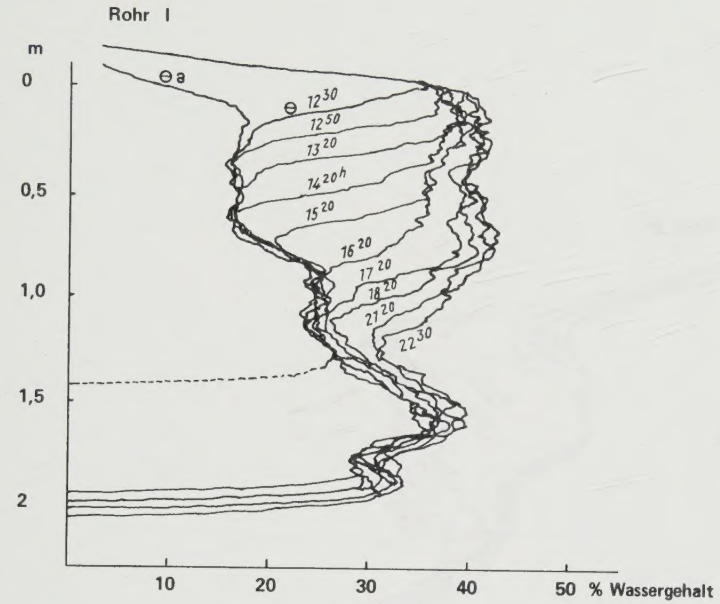
KORNSUMMENKURVE

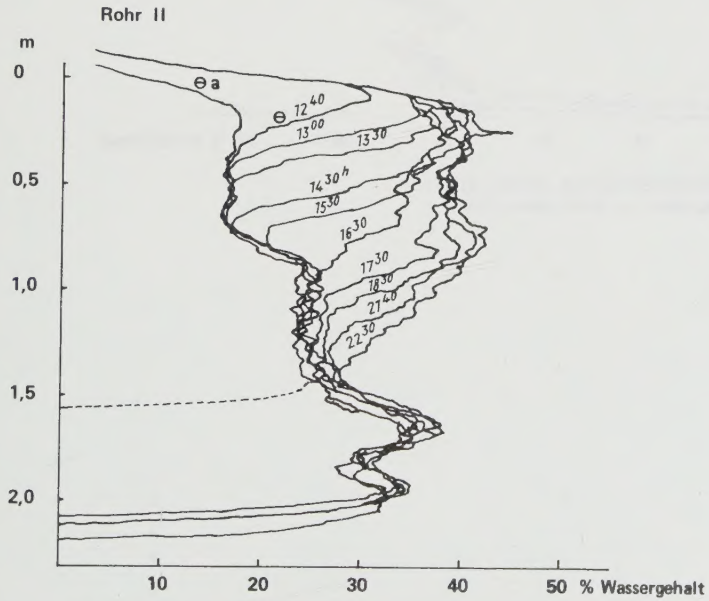


SIEBSUMMENLINIEN DER OBEREN HOMOGENEN SCHICHT: a
UND DER UNTEREN HOMOGENEN SCHICHT: b

Abb. 17

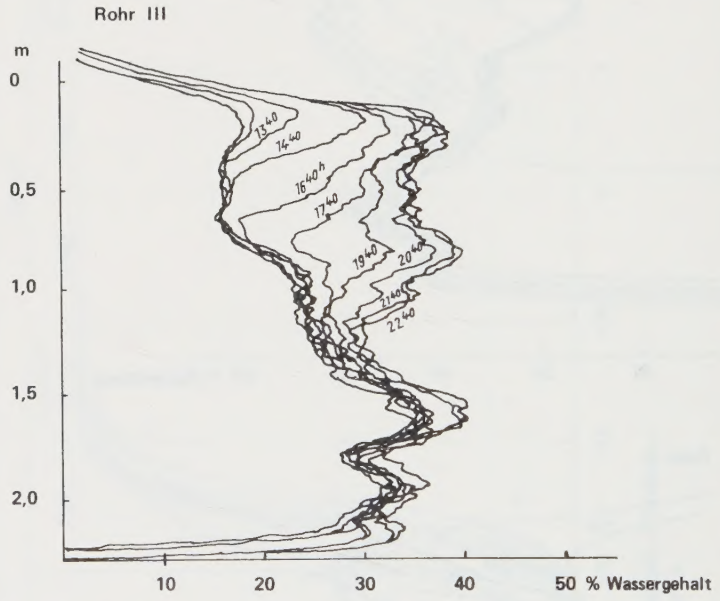
Abb. 18a





FEUCHTEPROFILE ROHR I UND II
(gemessen mit Neutronensonde)

Abb. 1



FEUCHTEPROFILE ROHR III
(gemessen mit Neutronensonde)